

# **Standortsökologische Baumarteneffekte in einem Mischbestand aus Gemeiner Fichte (*Picea abies* [L.] KARST.) und Sand-Birke (*Betula pendula* Roth) im Erzgebirge**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor rerum silvaticarum (Dr. rer. silv.)

vorgelegt von

**Diplom-Forstwirtin Karoline Schua**

geb. am 06.12.1981 in Berlin

Gutachter:

Herr Prof. Dr. habil. Karl-Heinz Feger  
Technische Universität Dresden  
Fakultät Forst-, Geo-, Hydrowissenschaften

Herr Ao. Prof. DI Dr. Klaus Katzensteiner  
Universität für Bodenkultur Wien  
Department für Wald- und Bodenwissenschaften

Ort und Tag der öffentlichen Verteidigung: Tharandt, 17.01.2012

Erklärung des Promovenden

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

**„Standortsökologische Baumarteneffekte in einem Mischbestand aus Gemeiner Fichte (*Picea abies* [L.] KARST.) und Sand-Birke (*Betula pendula* Roth) im Erzgebirge“**

wird hiermit bestätigt.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift (Vorname Name)

*Für meine Familie*

## **Danksagung**

Nachstehenden Personen, die mich während meines Promotionsprojektes begleiteten, möchte ich herzlich danken. Als erstes natürlich meinen beiden Betreuern Herrn Professor Karl-Heinz Feger (auch Gutachter) sowie Herrn Professor Sven Wagner. Finanziell und ideell ermöglicht hat mir das Projekt die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) durch ein Promotionsstipendium. An dieser Stelle würdige ich die Stiftung und danke dabei vor allem meiner dortigen Betreuerin Frau Dr. Nicole Freyer herzlich. Aber nicht allein durch die Stiftung war die Durchführung des Projektes möglich. Einen großen Teil der Analysekosten und Fahrtkosten wurde durch den Staatsbetrieb Sachsenforst getragen. Hier war es Herr Dr. Gerhard Raben, der großes Interesse an der Unterstützung des Projektes zeigte. Aber auch seinem Nachfolger Herrn Dr. Henning Andreae und seinem Chef Herrn Dr. Dirk-Roger Eisenhauer möchte ich sehr danken. Der Staatsbetrieb Sachsenforst war auch durch den Leiter des Forstbezirkes Marienberg Herrn Ingo Reinhold sowie die Revierleiter Herrn Fred Uhlig und Herrn Wolfram Richter bei der Untersuchungsflächenauswahl und -bereitstellung hilfreich. Für die Lieferung wichtiger Daten gilt mein Dank ebenfalls dem Staatsbetrieb Sachsenforst und dabei den folgenden Personen: Herrn Markus Weise (Kartenmaterial), Herrn Sven Martens (Forsteinrichtungsdaten), Herrn Jens Nixdorf (Informationen über durchgeführte Kalkungen) und Herrn Alexander Peters (Lieferung von Klimadaten). Neben der DBU und dem Staatsbetrieb Sachsenforst wurde ich auch von der Georg-Ludwig-Hartig Stiftung (Mittel für chemische Bodenanalysen) sowie von der Technischen Universität Dresden mit einem viermonatigen Abschlussstipendium unterstützt – vielen Dank! Sehr lobenswert ist die Hilfe der fleißigen Laborantinnen, die mir bei den Analysen zur Seite standen, der Frauen Ruth Rüger, Manuela Unger, Ina Klemm, Ulrike Gemballa, Karin Hörnig und der beiden Laborleiter, der Herren Dr. Frank Symosseck (Staatsbetrieb Sachsenforst) und Dr. Thomas Klinger (Institut für Bodenkunde und Standortslehre). Ohne sie wäre die vorliegende Arbeit undenkbar. Sehr starken Beistand erhielt ich auch durch Frau Christine Gebauer und Herrn Dietmar Rehn vom Staatsbetrieb Sachsenforst sowie Herrn Martin Kuntsch (Institut für Bodenkunde und Standortslehre) und Frau Antje Karge (Institut für Waldbau und Forstschutz). Herr Jörg Wollmerstädt half mir sowohl gerätetechnisch als auch wissenschaftlich, z. B. bei der Auswertung mit dem Strahlungsmodell tRAYci, sehr. Sowohl praktisch, als auch inhaltlich – es gab einen intensiven Gedankenaustausch – regten mich meine beiden Diplomanden Herr Alexander Tischer (Bodenvegetation und Humusmorphologie) und Herr Stefan Schober (biologische Aktivität) sehr an. Dank gilt den zu dieser Zeit bei mir aktiven studentischen Hilfskräften, die vor allem bei Messungen und Laborarbeiten ihre Arbeit sehr ernst nahmen: Frau

Jana Hertrampf, Frau Anna Leibel, Herr Hans Küchenmeister, Frau Maxi Binder, Frau Anne Wienigk, Herr Raphael Benning, Herr Simon Mayer, Herr Markus Engel und Herr Michael Jenke. Sehr wertvoll waren für mich die Anregungen meiner Kollegen, die überwiegend in der Anfangsphase des Projektes für erste Hilfestellungen bereit waren: Frau Dr. Doreen Schmiedel, Herr Nico Frischbier, Frau Dr. Franka Huth und Herr Alexander Menzer. Dank empfinde ich außerdem gegenüber meinen Freunden und meiner lieben Familie und dabei ganz besonders für Herrn Dr. Nils Fahlvik.

## **Inhaltsverzeichnis**

<b><u>1. Hintergrund und Hypothesenbildung .....</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1 Einleitung und Problemstellung .....	1
1.2 Stand des Wissens .....	3
1.3 Hypothesen .....	6
<b><u>2. Beschreibung des Untersuchungsgebietes .....</u></b>	<b><u>8</u></b>
2.1 Lage .....	8
2.2 Klima .....	9
2.3 Vegetation .....	10
2.4 Boden und Stoffhaushaltsbedingungen .....	12
<b><u>3. Material und Methoden .....</u></b>	<b><u>18</u></b>
3.1 Versuchsaufbau .....	18
3.2 Datenanalyse .....	20
3.3 Messung der Strahlung .....	25
3.4 Ansprache der Bodenvegetation .....	32
3.5 Erfassung der Streumenge und -verteilung .....	35
3.6 Streuzersetzungsexperiment .....	45
3.7 Ansprache des Humuskörpers .....	49
3.8 Chemische Analysen .....	49
<b><u>4. Experimentelle und mathematisch-statistische Auswertung .....</u></b>	<b><u>54</u></b>
4.1 Strahlung .....	54
4.2 Bodenvegetation .....	59
4.2.1 Vergleich der Sippenanzahlen, Deckungsgrade und Stetigkeiten nach Transekten .....	59
4.2.2 Vergleich der Sippenanzahlen, Deckungsgrade sowie qualitativer Aspekte nach Straten .....	66
4.2.3 Vergleich der Sippenanzahlen, Deckungsgrade sowie qualitativer Aspekte für die beiden Untersuchungsflächen im Gesamten .....	79
4.3 Streumenge und -verteilung .....	85
4.4 Dynamik der Streuzersetzung .....	91
4.5 Morphologie des Humuskörpers .....	97
4.6 Chemische und mikrobiologische Oberbodeneigenschaften .....	104
4.6.1 Vergleich ausgewählter Bodenkennwerte nach Transekten .....	104
4.6.2 Vergleich der Bodenkennwerte nach Straten .....	109

<b>5. Diskussion .....</b>	<b>124</b>
5.1 Kleinräumliche Veränderungen durch einzelbaumweise eingemischte Birken..	124
5.2 Einflussbereiche der Baumarten.....	133
5.3 Mess- und Berechenbarkeit von Einzelbaumeffekten .....	136
<b>6. Waldbauliche Bewertung und Schlussfolgerungen.....</b>	<b>144</b>
<b>7. Zusammenfassung/ Summary.....</b>	<b>158</b>
<b>8. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>163</b>
<b>9. Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>179</b>
<b>10. Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>184</b>
<b>11. Formelverzeichnis.....</b>	<b>185</b>
<b>12. Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....</b>	<b>187</b>
<b>13. Anlagenverzeichnis.....</b>	<b>189</b>
<b>14. Anlagen .....</b>	<b>190</b>

*„Wenn der Wald das gedachte Schlussbild einer Entwicklung darstellt, dann spiegelt er auch die Summe aller Faktoren wider, die auf seinen Standort einwirken. Unabhängig von ihrem hochkomplexen Zusammenspiel lassen sich diese Faktoren ganz allgemein der belebten und der nicht belebten Umwelt zurechnen, unabhängig von den Lebewesen bestimmen Klima, Lage und Relief das Waldbild mit. Eine besondere, eine besonders wichtige Rolle spielt der Boden, hier durchdringen sich alle Wirkungskreise des Ökosystems.“ ARENS (2010)*

## **1. Hintergrund und Hypothesenbildung**

### **1.1 Einleitung und Problemstellung**

Die Umwandlung traditioneller strukturarmer Koniferenreinbestände ist ein erklärtes Ziel der modernen Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Die langfristigen waldbaulichen Planungen für die Wälder der Zukunft laufen überwiegend auf Mischbestände hinaus. Zur nachhaltigen Gestaltung dieses mittel- und langfristigen Prozesses ist detailliertes Grundlagenwissen zur Wirkung der relevanten Baumarten und ihrer Mischungsverhältnisse erforderlich. Baumartenmischungen werden aus einer Reihe von Gründen propagiert: Diese umfassen ökologische Stabilität, Aufrechterhaltung oder Verbesserung der Produktionsfunktion, Natur- und Ressourcenschutz, Biodiversität sowie Ästhetik. So ergeben sich die Fragen, welche ökologischen Effekte von Mischungen ausgehen und ob bzw. wie sie modellhaft nachvollzogen werden können. Zur Beantwortung dieser Fragen ist es zunächst erforderlich, ökologische Ursache-Wirkungs-Beziehungen von Mischungen an konkreten Standorten zu quantifizieren. Die Fruchtbarkeit von Waldböden wird wesentlich mitbestimmt von der Bodenart, dem Mineralbestand, dem Gefüge, der Azidität sowie der Humusmenge und Humusqualität (FIEDLER 2001). Vor allem die Auswirkungen auf den Oberbodenzustand erscheinen sehr interessant, da dieser Ausdruck der biotischen Umsetzungsrate ist. Auch müssen solche Informationen sowohl für verschiedene Baumarten als auch standörtlich differenziert vorliegen. Gerade für den ökologischen Waldumbau muss im Detail bekannt sein, welches Potenzial eine bestimmte Baumart in Kombination mit einer anderen Baumart im Hinblick auf Veränderungen der Oberbodeneigenschaften besitzt (das



bestimmt deren „Pfleglichkeit“, d. h. Rückwirkung auf den Standort). So ist es möglich, Aussagen darüber zu treffen, ob diese Bestände in der Lage sind, Störungen abzapuffern und dabei Vorteile gegenüber leichter zu bewirtschaftenden Fichtenreinbeständen aufweisen. Weitgehend fehlen bislang experimentell gestützte Kenntnisse, welche Effekte sich in Mischbeständen ergeben. Bisher gibt es noch nicht ausreichend Angaben darüber, welche prozentualen Anteile von Laubbäumen (Mischungsgrad) oder welche Mischungsformen (z. B. einzelbaum-, trupp-, gruppen- oder horstweise Einmischung) erforderlich sind, um bestimmte Effekte (z. B. eine Verbesserung der Streuzersetzung) zu erzielen. Arbeiten, die in diese Richtung, gehen sind in Kap. 1.2 aufgeführt.

Die Nährstoffnachlieferung aus der Zersetzung von Laub- und Nadelstreu ist ein zentraler Prozess im Stoffhaushalt von Waldökosystemen. Bei einigen Böden - z. B. Sandböden - sind durch Unterschiede in der Baumartenwahl sowie deren Mischung tiefgreifende Effekte auf den Wasserhaushalt zu erwarten, da hier die organische Bodensubstanz das Wasserhaltevermögen maßgeblich steuert. Grundlegende Untersuchungen der Oberbodeneigenschaften in Mischbeständen sind unerlässlich, um die Kohlenstoff- und Stickstoff-Sequestrierung in Waldböden bei sich verändernden Klima- und Bewirtschaftungsbedingungen abzuschätzen. Diese Aspekte sind von zentraler Bedeutung für eine nachhaltige und umweltverträgliche Forstwirtschaft, gerade im Hinblick auf den Klima- und Gewässerschutz. Somit sind Untersuchungen zu Effekten bestimmter Mischungssituationen auf den Oberbodenzustand sowie kausal-ökologische Beziehungen sowohl aus Sicht der bodenökologischen Grundlagenforschung als auch der anwendungsorientierten waldbaulichen Forschung höchst interessant und praktisch relevant (vgl. WAGNER 2006).

Das Wuchsgebiet Erzgebirge weist hinsichtlich der Baumartenverteilung gegenwärtig 84 % Fichte auf (SMUL 2009). Weitere Baumarten sind nur in geringen Anteilen zu finden (Kiefer mit 2 %, sonstige Nadelbäume mit 5 %, Buche mit 3 %, Eiche mit 1 % und sonstige Laubbäume mit 5 %). An diesen Zahlen wird deutlich, welche Bedeutung die Fichte für dieses sächsische Wuchsgebiet hat. Für ganz Sachsen liegt der Anteil der Fichte bei ungefähr 35 %. 60 % der Fichtenbestände des Freistaates sind über 60 Jahre alt. Bestände dieses Alters rutschen in den weiteren Jahren der Bestandesentwicklung in den kritischen Bereich, in dem die Schadfaktoren Sturm und Borkenkäfer an Bedeutung zunehmen (Anlage 1).

### **1.2 Stand des Wissens**

Bekanntermaßen hängen Wachstum und Vitalität der Bäume entscheidend von der Beschaffenheit des Bodens ab, wie umgekehrt die Entwicklung der Böden auffällig von der Art der Baumbestockung bestimmt wird (z. B. WITTICH 1961; BREEMEN et al. 1997; FINZI et al. 1998a+b; SAMEC et al. 2007). Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass die Baumartenbestockung den Waldbodenhumus sowohl qualitativ als auch quantitativ beeinflusst. Einerseits liegt eine Reihe an Forschungsergebnissen zu den Effekten von einzelnen Bäumen auf Oberbodeneigenschaften vor - z. B. für *Pinus contorta* Dougl. ex Loud. (ZINKE 1962), für *Sequoia gigantea* (Lindl.) Decne. (ZINKE und CROCKER 1962 zit. n. HORNUNG 1985), für *Fagus grandifolia* Ehrh. (GESPER und HOLOWAYCHUCK 1970 zit. n. HORNUNG 1985), für *Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg. (CRAMPTON 1982 zit. n. HORNUNG 1985), für *Eucalyptus grandis* (Hill) ex Maiden (RYAN und MCGARITY 1983 zit. n. HORNUNG 1985), für *Quercus robur* L. sensu lato (BENIAMINO et al. 1991), für *Tsuga canadensis* (L.) Carr. und *Liriodendron tulipifera* L. (BOETTCHER und KALISZ 1990) sowie für *Fagus sylvatica* L., *Quercus robur* L., *Carpinus betulus* L., *Tilia cordata* Mill. und *Acer platanoides* L. (NORDÉN 1994). Andererseits konnte die Wirkung flächiger Voran- bzw. Unterbauten auf den Oberbodenzustand vielerorts beschrieben werden (u. a. BINKLEY 1995; HEINSDORF 1997; KONOPATZKY 1997; ROTHE 1997; WOLFF und RIEK 1997; HEITZ 1998; FISCHER et al. 2002; PRIETZEL 2004; BENS et al. 2006). Es existieren ebenfalls Arbeiten, die Oberbodeneigenschaften in reinen Koniferen- und Laubbaumbeständen sowie verschiedene Formen einer künstlichen Mischung von Streu untersuchten (z. B. SAETRE 1998; NILSSON et al. 1999). In der Literatur werden deutliche Standortsabhängigkeiten der mikrobiellen Aktivität (z. B. MERILÄ und OHTONEN 1997), des Streuabbaus (z. B. WITTICH 1964; NICKEL 1987; BERG et al. 1993; IRMLER 1995; AUGUSTO et al. 2002; FRIEDEL et al. 2006) und der Bodenvegetation (z. B. BEATTY 1984) beschrieben. Bisher ist es aber noch nicht gelungen, die Dynamik der Streuzersetzung für die vielfältigen Interaktionen von Baumarten standortsabhängig eindeutig zu beschreiben.

Für den Vergleich der Oberbodeneigenschaften in Beständen oder Plots aus reiner Sand-Birke (*Betula pendula* Roth) und reiner Gemeiner Fichte (*Picea abies* [L.] KARST.) existieren schon einige Untersuchungen, die sich aber nicht mit Fragen nach der Mischungsform bzw. dem Mischungsgrad befassen. SAETRE (1998) stellte unter 64-jähriger Fichte in der Streuauflage einen im Vergleich mit Birke um ca. eine Einheit geringeren pH-Wert (H<sub>2</sub>O) - nämlich 5,4 - fest. HAGEN-THORN et al. (2004) fanden in

Dänemark, Südschweden und Litauen im Mineralboden von 30-40 Jahre alten Birkenplots pH-Werte ( $\text{H}_2\text{O}$ ) von 5,0 (0-10 cm) und 5,2 (20-30 cm) und Fichtenplots 4,3 (0-10 cm) und 4,5 (20-30 cm). Auch zu anderen Oberbodeneigenschaften existieren Veröffentlichungen, die Birke und Fichte vergleichen. LETTL und HYSEK (1994) sprechen davon, dass der  $\text{N}_{\text{ges}}$ -Gehalt im Of-Horizont unter Fichte höher ist, während im Oh-Horizont der  $\text{N}_{\text{ges}}$ -Gehalt unter Fichte niedriger ist als unter Birke. BRANDTBERG und LUNDKVIST (2004) wiesen für die Fichten-Birken-Mischbestände im Vergleich mit Fichtenreinbeständen bessere Humusqualitäten durch günstigere C/N-Verhältnisse nach. HAGEN-THORN et al. (2004) fanden bei ihren Untersuchungen keine signifikanten Unterschiede zwischen Birke und Fichte beim Boden-C, -N und C/N-Verhältnis im mineralischen Oberboden (0-10 cm und 20-30 cm Tiefe in 30 bis 40 Jahre alten Baumartenplots). Einer Untersuchung von BRANDTBERG et al. (2000) zufolge, waren keine Baumartenunterschiede im  $\text{C}_{\text{ges}}$ - und  $\text{N}_{\text{ges}}$ -Gehalt zwischen den Böden unter den beiden Baumarten zu finden (20-30 Jahre alter Birken-Fichtenmischbestand). Dabei ist die Wirkungsdauer von 20-30 Jahren möglicherweise noch zu gering, um Baumartenunterschiede auszubilden. In der internationalen Literatur werden für die Birke deutliche Altersabhängigkeiten von Baumarteneffekten auf den Oberboden beschrieben. Beispielsweise konnte MILES (1981) bei seinen Untersuchungen in Schottland im Oberboden (0 - 5 cm, nach Entfernen der L- und F-Lage) mit zunehmendem Birkenbestandesalter ansteigende pH-Werte ( $\text{H}_2\text{O}$ ) nachweisen (18 Jahre: 3,9; 26 Jahre: 4,0; 38 Jahre: 4,7; 90 Jahre: 4,9). In den ersten 10 cm der Streuauflage fand SAETRE (1998) in einem 59 Jahre alten Birkenbestand in Schweden einen pH-Wert ( $\text{H}_2\text{O}$ ) von 6,5. Auch UZAKBAEVA (2005) berichtete, dass in der Streuauflage eines fünfzigjährigen Birkenbestandes in Kirgizstan ein pH-Wert ( $\text{H}_2\text{O}$ ) von 6,6 auftrat. In Fichten-Birken-Mischbeständen im östlichen Mittelschweden stellten BRANDTBERG et al. (2004) in der H-Lage folgende pH-Werte ( $\text{H}_2\text{O}$ ) fest: 4,8 (26 Jahre alter Bestand), 4,8 (31 Jahre alter Bestand), 4,9 (32 Jahre alter Bestand), 5,8 (32 Jahre alter Bestand). Auch bei MILES (1981) stiegen die Boden-pH-Werte mit zunehmenden Birkenbestandesalter (18 Jahre: 3,9; 26 Jahre: 4,0; 38 Jahre: 4,7; 90 Jahre: 4,9). Bezüglich der biologischen Aktivität zeigten die Untersuchungen bei MILES (1981) in Schottland eindeutig höhere Anzahlen an Regenwürmern pro  $\text{m}^2$  in den mittelalten und älteren Birkenbeständen (18 Jahre: 5; 26 Jahre: 27; 38 Jahre: 127; 90 Jahre: 78).

Mit Blick auf die mikrobielle Aktivität finden sich vor allem bei PRIHA et al. (2001) wertvolle Daten über ihre Studien in Birken und Fichtenplots. Zwar war der  $\text{C}_{\text{mic}}$ -Gehalt aus der Fumigations-Extraktion unter Birke größtenteils höher als unter Fichte, allerdings nicht signifikant. Bei  $\text{N}_{\text{mik}}$  waren im Oh-Horizont höhere Werte unter Birke als unter Fichte

nachzuweisen. Diese Tendenz konnte bei PRIHA et al. (2001) auch bei der Berücksichtigung des Bodenvolumens festgestellt werden. Im A-Horizont ist ein umgekehrter Trend sichtbar. PRIHA et al. (2001) haben zusätzlich auch die PLFA (Phospholipid-Extraktion) durchgeführt. Dabei war die Menge von mikrobiellen PLFAs unter Birke niedriger als unter Fichte. Die Verhältnisse von pilzlicher zu bakterieller PLFA unterschieden sich zwischen den Baumarten nur gering.

Seit einigen Jahren wird am Lehrstuhl für Waldbau der Technischen Universität Dresden erforscht, wie sich einzelne Laubbäume in Nadelwäldern auf Humus- und Bodeneigenschaften auswirken. Das Ziel besteht darin, Erkenntnisse über die flächenhafte Ausdehnung der Einzelbaumwirkungen sowie deren Intensitäten zu gewinnen (LEHMANN et al. 2006a+b; LEHMANN 2007; SCHUA et al. 2007; FRISCHBIER und ZEIBIG 2008). Beispielsweise konnten FRISCHBIER und ZEIBIG (2008) für die Baumarten Buche, Fichte und Birke erste Streumengen- und -verteilungsmodelle erstellen. Durch die modellgestützte Herleitung des Streuinputs sowie des Bestandesniederschlages und der Strahlung waren kausale Zusammenhänge bei der Vorrats- und Mächtigkeitsvariabilität der Of-Lage in einem Fichten-Buchenbestand deutlich aufzuzeigen (WÄLDER et al. 2008). LEHMANN et al. (2006a+b), LEHMANN (2007) und SCHUA et al. (2007) wiesen u. a. Unterschiede der Intensität von Effekten bezüglich der Oberbodeneigenschaften bei ungleich alten Trauben-Eichen in Kiefernreinbeständen nach. Auch verschiedene nicht-einzelbaumbezogene Untersuchungen zeigen, dass sich die Humuseigenschaften in differenzierten Bestandesaltern (z. B. EDMONDS 1979; BERG und STAAF 1980; FRANKLAND 1998; BÖTTCHER und SPRINGOB 2001) und Umbaualtern (z. B. FISCHER et al. 2002) unterscheiden. Die Veränderungen in unterschiedlichen Altern haben vielfältige Ursachen, die sowohl mit einer Änderung der Baumdimension, aber auch mit der unterschiedlichen Wirkungsdauer zusammenhängen können. Diese Veränderungen vermögen wiederum bedeutende Ressourcen, die den Waldboden erreichen (Niederschlag, die photosynthetisch aktive Strahlung sowie den Laubeintrag, also Streumenge und -verteilung), zu beeinflussen. Bei den Erklärungsversuchen zu Effekten einer einzelnen Trauben-Eiche in Wäldern der Gemeinen Kiefer zeigte sich, dass es sich um Ursachenkomplexe handeln muss. Daher ist es zukünftig wichtig, möglichst viele Faktoren, die durch die Präsenz einer beigemischten Art beeinflusst werden, zu analysieren, um kausale Zusammenhänge zu beschreiben (z. B. HÄTTENSCHWILER 2005; SCHEU 2005).

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Anzahl von Mischbeständen scheinen vor allem diejenigen Untersuchungen interessant, die es ermöglichen für verschiedene Mischungs-

arten optimale Mischungsgrade und Mischungsformen abzuleiten. In dieser Richtung existieren noch viel zu wenige Veröffentlichungen. Die im Folgenden aufgeführten Publikationen geben für die Mischung aus Fichte und Birke Hinweise zu Mischungsgraden: MIELIKÄINEN (1985) stellte für die Mischung von Gemeiner Fichte und Sandbirke einen höheren Ertrag fest als für einen Fichtenreinbestand. Dieser höhere Ertrag galt, wenn *Picea abies* und *Betula pendula* in einem Verhältnis von 75:25 % gemischt waren. RITTERSHOFER (2000) empfiehlt eine Zeitmischung von Birke in beschränkter Anzahl und auf Fehlstellen. Er weist darauf hin, dass die Anzahl der Birken i. d. R. auf 20 (-30) je ha begrenzt bleiben sollte, damit später keine bleibenden Lücken entstehen. In der bodenkundlichen Forschung sind keine direkten Mischgrade für die beiden Baumarten angegeben. Doch einige Forschungsergebnisse ermöglichen, durch weitere Analysen (z. B. Streuverteilungsmodelle) Rückschlüsse auf empfehlenswerte Mischungsgrade zu ziehen. Darauf wird ausführlich in Kap. 6 eingegangen. Zu nennen ist hierbei das Ergebnis von SAETRE (1998), dass die von ihm untersuchte Regenwurmart (*Aporrectodea caliginosa* Savigny) für ihre Aktivität einen Birkenstreuanteil von wenigstens 25 % benötigt. Bezüglich der „optimalen“ Mischungsformen (vgl. Kap. 6) werden wertvolle Hinweise vor allem vor dem Hintergrund der Holzqualität gegeben (z. B. v. WYL et al. 2003; v. LÜPKE 2004; GREB 2008). Nach WAGNER (2008) sind aufgrund der horizontalen Laubverfrachtung, die vom Einzelbaum ausgehend meistens nicht über 20 m reicht, eher Gruppenmischungen zu empfehlen. Allerdings sind nach WAGNER (2008) auch einzelbaumweise Beimischungen, nämlich im Falle einer eindeutig vorwüchsigen Baumart, gegenüber Trupp- oder Gruppenmischung zu empfehlen, um bei der Ernte dieser Baumart im verbleibenden Bestand keine allzu großen Lücken zu hinterlassen (WAGNER 2008). Auf die aufgezählten Veröffentlichungen zur Mischungsform wird im Kap. 6 ausführlicher eingegangen.

### **1.3 Hypothesen**

Das Ziel der Dissertation ist, die Wirkung von Mischungen in einem Wirtschaftswald auf den Oberbodenzustand zu quantifizieren. Das erfolgt für einen Bestand, der sowohl hinsichtlich der Altersstruktur als auch der Stoffeinträge und der Kalkung für das Erzgebirge repräsentativ ist. Dies soll am Beispiel eingemischter Sand-Birken (*Betula pendula* Roth) in Beständen der Gemeinen Fichte (*Picea abies* [L.] KARST.) geschehen. Durch die vorliegende Arbeit, sowie zukünftige Forschung wird es möglich sein, Entscheidungshilfen für die Praxis zu liefern, wie viele Birken in Mischungen mit Fichten auf einem Hektar notwendig sind und wie sie verteilt sein müssen, um bestimmte Effekte (in der Humusaufba-

ge, der Bodenvegetation etc.) zu erzielen. Dabei sollen die Mischungen den heutigen Anforderungen an eine nachhaltige Waldbewirtschaftung gerecht werden. Das bedeutet auch, dass die Nutzung der Leistungsfähigkeit wichtiger Wirtschaftsbaumarten (z. B. der Gemeinen Fichte) gewährleistet bleiben muss.

Vor diesem Hintergrund lassen sich für die vorliegende Arbeit folgende Hypothesen formulieren:

**Hypothese 1: Bereits einzelbaumweise eingemischte Birken können in Fichtenbeständen zu kleinräumlichen Veränderungen (z. B. des Oberbodens oder der Bodenvegetation) führen. Das gilt auch für gekalkte Bestände. Die Einmischung einzelner Birken führt im Oberboden zu höheren pH-Werten, zu höheren Gehalten an Calcium und Magnesium, engeren C/N-Verhältnissen, einer höheren mikrobiellen Aktivität und damit verbundenen besseren Humusformen. Die Birke beeinflusst auch die Ressourcenverfügbarkeit für die Bodenvegetation (z. B. der photosynthetisch aktiven Strahlung) und verändert somit deren Artenanzahl, -zusammensetzung und Deckungsgrade.**

**Hypothese 2: Die Veränderung der Oberbodeneigenschaften durch Birke ist auf die Bereiche beschränkt, in denen Birkenstreu einen Einfluss hat (z. B. AUBERT et al. 2006).**

**Hypothese 3: Einzelbaumeffekte sind mess- und berechenbar.**

Natürlich sind Veränderungen von Oberbodeneigenschaften von sehr vielen Faktoren abhängig, die in ihrer Vollständigkeit nicht in einem einzelnen Promotionsvorhaben abgedeckt werden können (z. B. Untersuchungen zum Bestandesniederschlag oder zur Feinwurzelverteilung). Trotzdem sollen durch diese Arbeit fundierte Erkenntnisse auf der Prozessebene gewonnen werden, so dass zukünftig Grundlagen für eine modellhafte Beschreibung der mittel- und längerfristigen Oberbodenentwicklung vorliegen.

## 2. Beschreibung des Untersuchungsgebietes

### 2.1 Lage

Um eine Repräsentanz der Untersuchungen für sächsische Verhältnisse zu gewährleisten, wurden Flächen im Wuchsgebiet „Erzgebirge“ und dort im Wuchsbezirk „Mittleres Oberes Erzgebirge“ ausgewählt. Die Untersuchungsflächen ( $50^{\circ}38'N$ ,  $13^{\circ}17'O$ ) befinden sich in der Nähe des Ortes Ansprung bei Olbernhau (Abb. 1).

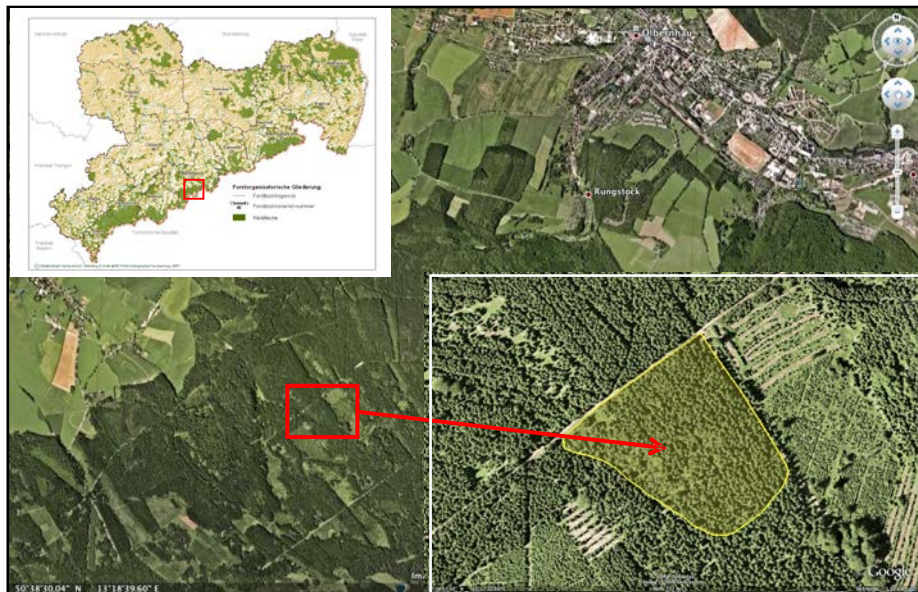


Abb. 1: Karte des Freistaates Sachsen (Quelle: STAATSBETRIEB SACHSENFORST 2007) und Luftbilder des Untersuchungsbestandes (Quelle: GOOGLE EARTH 2008, verändert)

Die Teilfläche a<sup>5</sup> in der Abteilung 80, in der sich die Untersuchungsflächen befinden, liegt in einer Höhe von 725 bis 740 m ü. NN (Abb. 2). Die Teilfläche ist eben bis schwach geneigt und nach Norden exponiert.

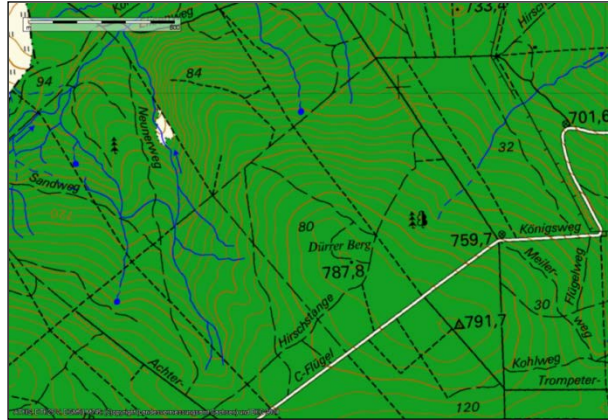


Abb. 2: Darstellung der Abteilung 80 auf der topographischen Karte 1:25000 (Quelle: LANDES-VERMESSUNGSAMT SACHSEN 2004)

Bei der Auswahl des Bestandes wurde eine Anbindung an das Versuchsnetz des Staatsbetriebes Sachsenforst (Messfläche Olbernhau des intensiven forstlichen Umweltmonitorings [Level II-Fläche der EU], der Stichprobenpunkte der Bodenzustandserhebung [BZE = Level I-Flächen der EU im 4 km x 4-km-Raster] sowie der Flächen der vormaligen „Ökologischen Waldzustandskontrolle“ [ÖWK] und des EU-Projektes RECOGNITION) angestrebt.

### **2.2 Klima**

Das Untersuchungsgebiet gehört zur Makroklimastufe „Höhere Berglagen“ mit feuchtem Klima (Hf). Charakteristisch für die Jahre 2002 bis 2008 sind Jahresdurchschnittsniederschläge von 977 mm und eine Jahresdurchschnittstemperatur von 5,8°C (Abb. 3 und Abb. 4 sowie Anlagen 2 und 3).



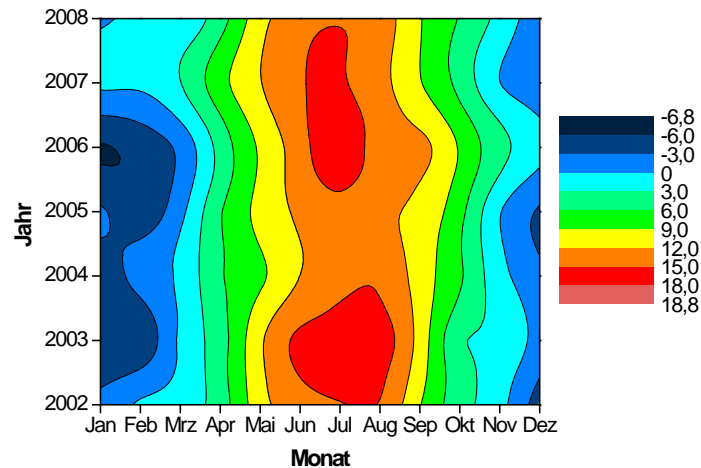


Abb. 3: Monatsmittel der Lufttemperatur [°C] der Waldklimastation Olbernhau, Zeitraum 2002 bis 2008 (Datenquelle: Staatsbetrieb Sachsenforst)

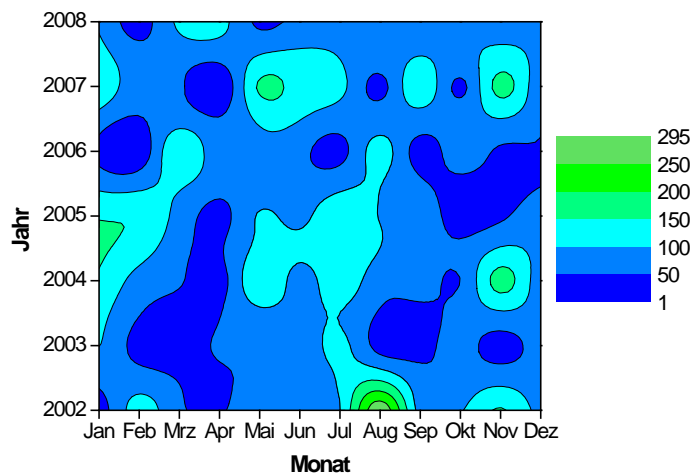


Abb. 4: Monatssummen des Niederschlags [mm] für die Waldklimastation Olbernhau, Zeitraum 2002 bis 2008 (Datenquelle: Staatsbetrieb Sachsenforst)

Diese Temperatur- und Niederschlagswerte stammen von der Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau, die in einer Abteilung neben der Untersuchungsfläche liegt und einen freiflächenartigen Charakter aufweist. Sie wurde 1995 mit verschiedenen Baumarten bepflanzt.

### **2.3 Vegetation**

Der Bestand wird durch Gemeine Fichte (*Picea abies* [L.] KARST.) im Alter von 60 bis 80 Jahren gebildet und im Süden durch baumweise bis gruppenweise eingemischte Gemeine Birke (*Betula pendula* Roth) im Alter von 60 Jahren ergänzt. Die Birken weisen an einigen Stellen Kronenbrüche und eine geringe Qualität auf. Bei den Fichten sind 51-70 % von Schälsschäden und über 70 % von Rotfäule betroffen. Außerdem existiert noch ein

Überhälter Rotbuche, der aber weit entfernt von den Untersuchungstransekten steht. Der Kronenschluss ist locker, doch örtlich steht die Fichte geschlossen. Die Fichte stammt aus der künstlichen Verjüngung mit dem Ziel eines Fichtenreinbestandes, was oft über mehrere Baumgenerationen praktiziert wurde. Hingegen hat sich die Birke in diesem Bestand natürlich verjüngt und zwar an den Stellen, an denen die Fichte ausgefallen ist. Die Birke wurde nicht wie üblich aus diesem Bestand „herausgepflegt“, was für die Bewirtschaftung mit Fichte selten ist (vgl. Kap. 6).

Das Erzgebirge weist nach DENNER (2006) eine ausgeprägte Differenzierung in Höhenstufen (hochkollin bis hochmontan) auf. Den Höhenstufen können nach der **P**otentiell **N**atürliche **V**egetation (**PNV**) nach SCHMIDT et al. (2002) jeweils charakteristische zonale Waldgesellschaften (höhenzonale Leitgesellschaften) zugeordnet werden (zitiert nach DENNER 2006):

- hochkollin: Hochkolliner Hainsimsen-Ei-Bu-Wald (Luzulo-Fagetum, kolline Höhenform),
- submontan: Submontaner Hainsimsen-Ei-Bu-Wald (Luzulo-Fagetum, submontane Höhenform),
- montan: Hainsimsen-Ta-Fi-Bu-Wald (Bergmischwald, Luzulo-Fagetum, montane Höhenform),
- Übergang montan-hochmontan: Wollreitgras-Fi-Bu-Wald (Calamagrostio villosae-Fagetum),
- hochmontan: Wollreitgras-Fi-Wald (Calamagrostio villosae-Piceetum).

Nach DENNER (2006) werden diese zonalen Waldgesellschaften unter besonderen Standortsbedingungen (Überflutung, Moore, Blockschutt, Felsen) von azonalen und extrazonalen Gesellschaften abgelöst (z. B. Hainmieren-Schwarzerlen-Bachwald, Moorwälder, Eschen-Ahorn-Schlucht- und Schatthangwald, Färberginster-Traubeneichenwald). Mesophile Buchenmischwälder sind selten und kommen z. B. auf Basalkuppen vor (SCHWANECKE und KOPP 1996 und SCHMIDT et al. 2002).

Die Abb. 5 zeigt die Verteilung der Waldgesellschaften im sächsischen Mittelgebirgsraum unter den gegenwärtigen Umweltbedingungen. Für die Standortsbedingungen der Untersuchungsfläche (siehe dazu Kap. 2.4) nennt GEMBALLA (2005) als natürliche Waldgesellschaft den Wollreitgras-Fichtenwald und als Stamm-Vegetationsform der Standortserkundung einen Fichten-(Tannen-Buchen)-Wald. Hauptbaumart wäre demnach die Fichte. Als Mischbaumart wird die Tanne, als Begleitbaumarten werden die Buche und die Eberesche genannt. Für den Bestandeszieltyp ist nach EISENHAUER et al. (2005) ein Fichten-Bergwald vorgegeben. Dabei sollte die Mischung zu 70 % bis 90 % aus Gemeiner

Fichte und 10 bis 30 % aus den Mischbaumarten Weißtanne und Höhenkiefer bestehen. Ferner sind laut diesen Autoren keine Investitionen bei der Verjüngung dieser Mischbaumarten vorgesehen. Die Verjüngung muss deshalb auf natürlichem Wege erfolgen.

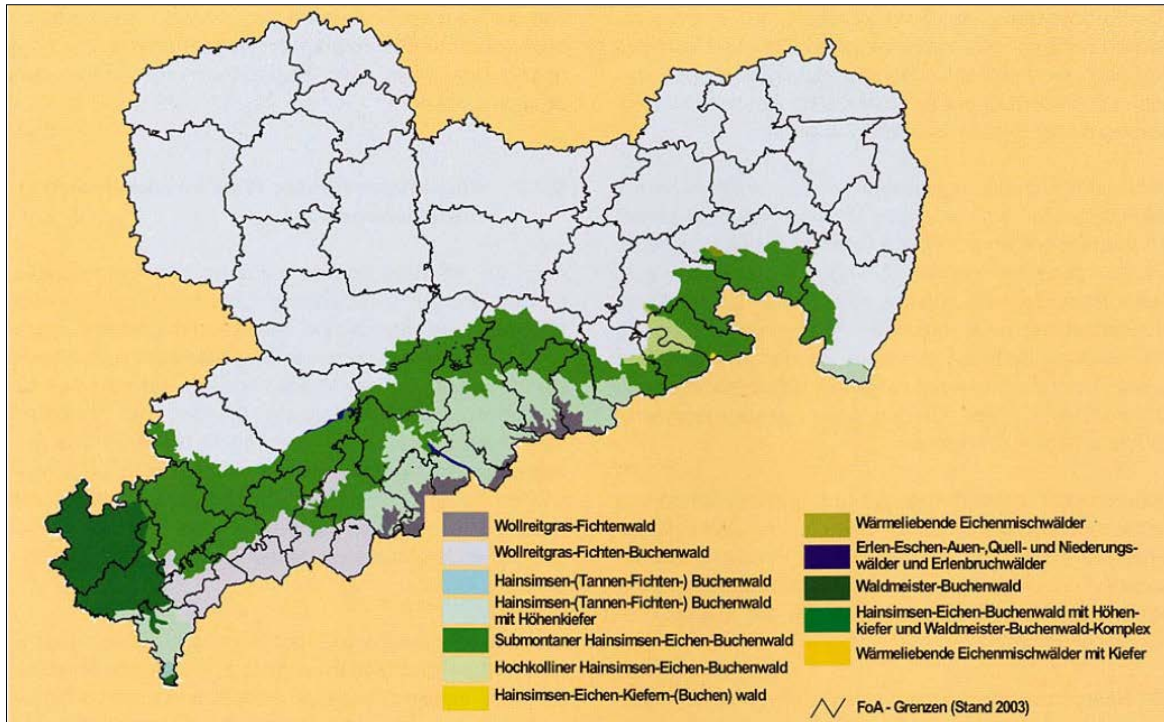


Abb. 5: Verteilung der Waldgesellschaften im sächsischen Mittelgebirgsraum unter gegenwärtigen Umweltbedingungen (Quelle: SMUL 2005)

Die Bodenvegetation wurde für diese Arbeit intensiv erhoben. Diese Ergebnisse sind in Kap. 4.2 ausführlich dargestellt. Eine waldwachstumskundliche Beschreibung der Baumschicht erfolgt in Kap. 3.3.

### **2.4 Boden und Stoffhaushaltsbedingungen**

Als Grundgestein steht Rotgneis (Tab. 1) der Saydaer-Olbernhauer Gneiskuppel (Orthogneis) an, dessen Gehalte an Mg und Ca deutlich niedriger liegen als die von Graugneisen (NEBE 1964). Hingegen sind die K-Gehalte höher. Da im Gebiet der Untersuchungsfläche auch Graugneis auftritt, wurde durch eigene Analysen geprüft, ob es sich tatsächlich um Rotgneis handelt. Rotgneis konnte eindeutig nachgewiesen werden (Anlage 4).

## 2. Beschreibung des Untersuchungsgebietes

---

Tab. 1: Gesamtgehalte des Ausgangsgesteins (Rotgneis) der Bodenbildung von der Untersuchungsfläche ([Gewichts-%] bzw. für geringere Gehalte [mg/kg])

Al	K	Na	Fe	Ca	Mg	Ti	P	Ba	Mn
[%]									
6,79	3,96	1,72	1,32	0,29	0,21	0,12	0,08	0,02	0,02

Cr	Sr	Zn	Pb	S	V	Cu	Ni
[mg/kg]							
7,17	37,06	33,07	9,18	2,21	16,32	5,11	2,33

Ausgangssubstrat für die Bodenbildung ist ein periglazialer Gruslehm über Verwitterungsschutt aus Gneis. Dieses Lockermaterial wurde durch periglaziale Prozesse v. a. physikalisch verwittert und durch Solifluktion und Kryoturbation umgelagert. Der Bildung periglazialer Lagen geht eine Phase feuchter Klimabedingungen mit Bodenbildung und teilweise intensiven flächenhaften Ver- und Abspülungsprozessen voraus. Im Holozän wurde wieder vermehrt abgetragen (KLEBER 1992; SAUER 2002 zit. n. DIETZE 2006). Auch ältere Bodenbildungen mit intensiver chemischer Verwitterung unter tropisch-subtropischen Klimabedingungen (Tertiär, Präcenoman) können in die Fließerden integriert sein (NEBE 1961). Aufbau und Abgrenzung der einzelnen periglazialen Lagen sind bei FIEDLER und HUNGER (1970) detailliert beschrieben. Aus den Periglazialprozessen resultiert auch der relativ hohe Skelettreichtum. Auf der Untersuchungsfläche entwickelten sich Braunerde-Podsole und Podsol-Braunerden. Die dominierende Lokalbodenform ist ein „Neuhausener Gneis-Braunpodsol (NeGn)“. Die Standortskarte weist die folgende Standortsformengruppe aus: **HfTZ3** (feuchte höhere Berglagen, ziemlich arme trockenere unvernässte normal bewirtschaftbare Standorte). Die eigene Ansprache des Bodens der Untersuchungsfläche zeigte, dass sich der Bodentyp kleinflächig unterscheidet. Teilweise dominieren die Eigenschaften der Braunerde und partiell die des Podsols (gemäß AK STO 2003 und AD-HOC-AG BODEN 2005). Beispiele sind in Abb. 6a bis c mit den dazugehörigen Daten in Tab. 2 dargestellt.

## 2. Beschreibung des Untersuchungsgebietes

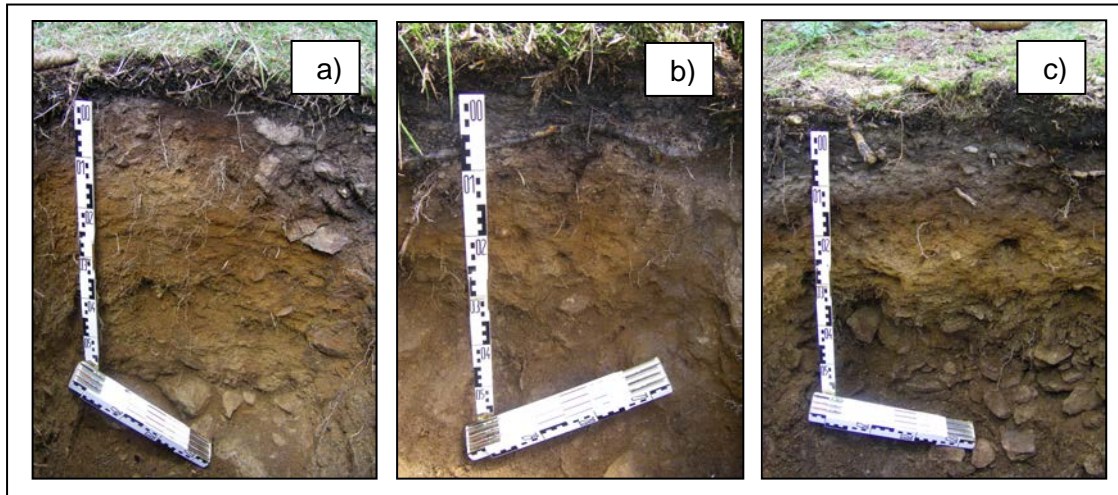


Abb. 6: a) Schwach podsolige Braunerde, b) Stark podsolige Braunerde, c) Braunerde-Podsol

Tab. 2: Tiefen- und Mächtigkeitsangaben [cm] der Bodenhorizonte von den Bodenprofilen auf der Untersuchungsfläche

Abb. 6a			Abb. 6b			Abb. 6c		
Horizont	Mächtigkeit [cm]	Tiefe [cm]	Horizont	Mächtigkeit [cm]	Tiefe [cm]	Horizont	Mächtigkeit [cm]	Tiefe [cm]
L	1	+ 6 bis + 7	L	1	+4 bis +5	L	1	+ 3,5 bis + 4
Of	2	+ 4 bis + 6	Of	2	+ 2 bis +4	Of	1,5	+ 2 bis + 3,5
Oh	4	0 bis + 4	Oh	2	0 bis + 2	Oh	2	0 bis + 2
Aeh	12	0-12	Ahe	4	0 bis 4	Ahe	5	0 bis 5
Bv	26	12-38	Ae	5	4 bis 9	Ae	6	5 bis 11
BvCv	33	38-71	(Bsv)	6	9 bis 15	Bsh	3	11 bis 14
Cv	-	71 +	Bv	35	15 bis 40	Bhs	3	14 bis 17
			BvCv	13	40 bis 53	Bv	15	17 bis 32
			Cv	-	53 +	Bv-Cv	20	32 bis 52
						Cv	-	52 +

Neben den bodenchemischen Eigenschaften, die durch das Ausgangssubstrat vorgegeben sind, spielen im Untersuchungsgebiet aufgrund der Nähe zum Erzgebirgskamm Depositionen eine große Rolle (Tab. 3). Auffällig sind die hohen Ammonium-Stickstoffeinträge in den Jahren 2002 und 2003. Ursache dafür sind wohl die Witterungsextreme in diesen beiden Jahren und die damit verbundenen Folgen. Im August 2002

traten Starkniederschläge auf, die das Jahrhunderthochwasser in Sachsen bewirkten. Diese hohen Niederschläge führten wahrscheinlich zu einer erhöhten nassen Deposition. Das Jahr 2003 war dagegen ein Trockenjahr mit einer starken Hitze- und Dürreperiode. Damit einher gingen niedrige landwirtschaftliche Erträge und dadurch eine schlechtere Verwertung des Stickstoffs auf den gedüngten landwirtschaftlichen Flächen. So konnte mehr Stickstoff aus diesen Flächen emittieren und später in die Dauerbeobachtungsfläche eingetragen werden. Die Ausgasung von Stickstoff aus Wirtschaftsdünger ist neben dem pH-Wert auch abhängig von der Temperatur. Je höher die Temperatur ist, desto mehr Stickstoff wird freigesetzt. Aktuell werden ca. 25 kg/ha Stickstoffverbindungen (Ammonium- und Nitratstickstoff) in die Fläche eingetragen (Tab. 3). Mit Hilfe der ökosystemspezifischen Berechnung der sogenannten Critical Loads (Verträglichkeitsschwellen) stellte der Staatsbetrieb Sachsenforst für die Monitoringfläche Olbernhau fest, dass mehr Stickstoff eingetragen wird als das Waldökosystem auf Dauer vertragen kann (SMUL 2009). Dies ist sowohl für die Eutrophierung als auch für die Versauerung des Waldbodens von Bedeutung.

Tab. 3: Jährliche Raten des Stoffeintrages in Kilogramm pro Hektar mit der modellierten Gesamtd deposition für die forstliche Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau in den Jahren 1999 bis 2008, Quelle: SMUL (2009)

Jahr	H	K	Ca	Mg	Na	NH <sub>4</sub> -N	Cl	NO <sub>3</sub> -N	SO <sub>4</sub> -S
1999	1,8	3,0	4,1	0,8	6,2	13,4	10,8	10,5	17,9
2000	2,4	4,8	4,1	1,1	9,0	15,9	17,9	16,5	24,4
2001	2,9	7,5	16,1	7,5	7,8	17,8	17,2	17,3	24,2
2002	2,7	4,7	9,0	3,8	6,3	28,7	11,5	16,0	26,5
2003	2,0	3,9	5,0	1,5	5,7	21,9	12,7	13,7	18,1
2004	1,6	4,1	8,1	2,5	8,2	13,7	16,4	12,5	16,5
2005	1,9	3,7	4,9	1,4	6,0	15,4	12,1	14,4	15,8
2006	1,6	5,8	5,6	1,6	5,8	15,6	14,2	13,1	14,6
2007	1,6	3,9	5,5	1,8	9,6	16,0	20,7	13,0	16,2
2008	1,5	3,5	6,0	1,5	7,5	11,9	13,6	13,3	15,7

Neben den Stickstoffverbindungen Ammonium und Nitrat hat hauptsächlich der Schwefel einen großen Einfluss auf die Höhe der Säure-Gesamtd deposition im Wald. Nach WUNDERLICH et al. (2006) gilt die Dauerbeobachtungsfläche in Olbernhau als die am höchsten schwefelbelastete Level-II-Fläche Sachsens. Die jährliche Gesamtd deposition von Schwefel (SO<sub>4</sub>-S) ist auf der Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau allerdings in den letzten Jahren deutlich gesunken. Besonders in den 1970/80er Jahren dürften hier die S-Einträge um ein Vielfaches höher gewesen sein (vgl. WUNDERLICH et al. 2006). Heute liegen die Schwefeldepositionen bei etwas über 15 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> und sind damit im unkriti-

schen Bereich (SMUL 2009). Die hohen S-Depositionen der Vergangenheit spiegeln sich in den hohen S-Gehalten im Boden wider, besonders in den Auflagehorizonten.

Um der atmogenen Versauerung des Waldbodens entgegenzuwirken, erfolgten auf der Untersuchungsfläche wiederholt Kalkungen mittels Flugausbringung (Tab. 4). Die hohen Calcium- und Magnesiumwerte im Jahr 2001 (Tab. 3) deuten auf eine Einwehung von Kalk in die Dauerbeobachtungsfläche hin.

Tab. 4: Kalkungen auf der Untersuchungsfläche

Jahr	Ausbringungsmenge	Herkunft	Kalkart
1989	2,5 t/ha	KAM 80	Mg-Mergel, gemahlen
1996	3,5 t/ha	GEOM 90	Kohlensaurer Mg-Kalk 88, gemahlen
2001	4,5 t/ha	WÜDO 88	Kohlensaurer Mg-Kalk 88, gemahlen

Für die weitere Charakterisierung der Untersuchungsfläche wurde das Profil c (Abb. 6c) exemplarisch genauer beschrieben (Tab. 5). Die zugehörigen Analysemethoden sind im Kap. 3.8 beschrieben. Die Kalkausbringungen sind vor allem durch die  $C_{\text{carbonat}}$ -Gehalte im gesamten Profil nachzuweisen (Tab. 5). Hierbei fallen die besonders hohen Gehalte in der Auflage auf. Sie wurden in zwei Laboren überprüft. Offenbar kam es in dem skelettreichen grobporenreichen Mineralboden aber auch zu einer gewissen Tiefenverlagerung von ungelöstem Kalk. Auch die Gehalte an austauschbarem  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  (Tab. 5) weisen auf einen deutlichen Einfluss der Dolomitkalkung hin. Der bodenchemische Zustand des Profils ist repräsentativ für dieses Region (vgl. LFP 2004). Es handelt sich um austauschschwache, saure Böden.

## 2. Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Tab. 5: Bodenphysikalische und -chemische Beschreibung des Bodenprofils c (die Angabe der Gesamtgehalte bzw. für den Humus z. T. KW-extrahierbaren Gehalte erfolgt in Masse-% bzw. für geringere Gehalte in mg/kg), n. A. ... nicht analysiert

Horizont	Tiefe	TRD <sub>Feinb.</sub>	Skelett- gehalt	pH	pH	C	N	C <sub>carbonat</sub>	C <sub>org</sub>	C <sub>org</sub> /N
	[cm]	[g*cm <sup>-3</sup> ]	[%]	H <sub>2</sub> O	KCl	[%]				[-]
L	+ 3,5 bis +4	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
Of	+ 2 bis + 3,5	0,15	0	5,04	4,42	48,9	2,1	6,5	42,4	20
Oh	0 bis +2	0,28	0 bis 28	5,02	4,37	41,2	2,1	7,4	33,8	16
Ahe/Ae	0 bis 11	0,83	36	3,94	3,05	14,4	0,7	1,7	12,7	18
Bsh/Bhs	11 bis 17	0,51	50	3,87	3,04	7,2	0,3	0,4	6,8	23
Bv	17 bis 32	0,80	41	4,47	3,94	4,1	0,2	0,3	3,8	19
Bv/Cv	32 +	n. a.	n. a.	4,63	4,11	1,8	0,1	0,5	1,3	13
Horizont	P	K	Na	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Al	Pb
	[%]									
L	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
Of	0,1	0,05	0,0	0,8	0,1	0,20	0,3	0,05	0,2	0,01
Oh	0,1	0,06	0,0	0,9	0,4	0,26	1,0	0,02	0,5	0,02
Ahe/Ae	0,1	0,09	0,0	0,1	0,1	0,08	0,9	0,00	0,7	0,02
Bsh/Bhs	0,2	2,3	0,6	0,1	0,2	0,04	4,3	0,02	4,6	0,02
Bv	0,1	2,6	0,7	0,1	0,2	0,03	3,1	0,03	5,7	0,00
Bv/Cv	0,1	2,8	0,9	0,2	0,5	0,02	2,9	0,04	6,7	0,00
Horizont	H <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	KAK <sub>eff</sub>	BS
	[µeq/g]									[%]
L	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
Of	1,14	1,9	320,2	1248,9	23,3	5,7	24,0	0,24	1625,37	98,3
Oh	1,25	6,6	775,2	1121,4	16,2	11,8	4,7	1,15	1938,12	99,3
Ahe/Ae	12,11	135,1	131,1	90,1	9,2	6,1	0,16	31, 2	415,05	57,0
Bsh/Bhs	0,97	60,0	2,2	3,5	0,15	0,7	0,09	0,87	68,29	9,4
Bv	0,61	38,4	0,2	1,1	0,19	1,0	<0,01	0,12	41,68	6,0
Bv/Cv	12,43	82,9	15,1	7,2	0,5	0,9	<0,01	16, 5	135,48	17,5



### **3. Material und Methoden**

#### **3.1 Versuchsaufbau**

Schwierigkeiten bei der Quantifizierung ökologischer Besonderheiten von Mischungen sind u. a. darin begründet, dass die Strukturvielfalt in Mischungen vergleichsweise höher ist als in Reinbeständen (WAGNER 2005). Zu der Variabilität der Alters-, Vertikal- und Durchmesserstruktur von Reinbeständen kommen z. B. noch die Mischungsart, der Mischungsgrad und die Mischungsform als Faktoren hinzu. Bei den sehr vielseitigen Strukturen erscheint daher ein Ansatz vorteilhaft, der die ökologische Wirkung von Einzelbäumen ihrer Intensität und Qualität nach erfasst und daraus für variabelste Konstellationen auf die Verhältnisse von Mischungen schließt. Dabei werden Einzelbaumeffekte nach WAGNER (2005) als Phänomene definiert, die im räumlichen Zusammenhang mit der Position von Einzelbäumen in Wäldern stehen. Diese Effekte können in ihrer Qualität und Intensität gemessen werden. Üblicherweise ist ein Gradient der Intensität oder auch Qualität der Effekte mit der Entfernung vom Einzelbaum festzustellen. Für die Erfassung von Effekten ist es deshalb wichtig, Verbindungen zu den Nachbarbäumen herzustellen, um das Wechselspiel zweier Baumarten genauer zu betrachten. Deshalb war es erforderlich, auch die Überlappungszonen zu untersuchen. In diesen Zonen treten z. B. verschiedene Mischungsverhältnisse der Streu auf. Zwei Baumarten beeinflussen also den Oberbodenzustand unterschiedlich stark. Im Rahmen der Untersuchungen wurden insgesamt 37 Baum-Baum-Transekte angelegt, wobei der Ausgangspunkt der Stamm eines Einzelbaumes ist (Abb. 7). Bei der Auswahl der Transekte war auf möglichst homogene Bodenverhältnisse zu achten, weshalb der gewählte Abstand bei Störungen (z. B. liegende Baumstämme, Stubbenflächen, Verwerfungen im Profil) variiert. Vor allem für die Beprobung des Oberbodens und die Ansprache der Bodenvegetation wurden Zonen gemieden, die durch angrenzende Wege oder Nutzungseingriffe (z. B. Befahren, Begehen) beeinflusst erschienen.

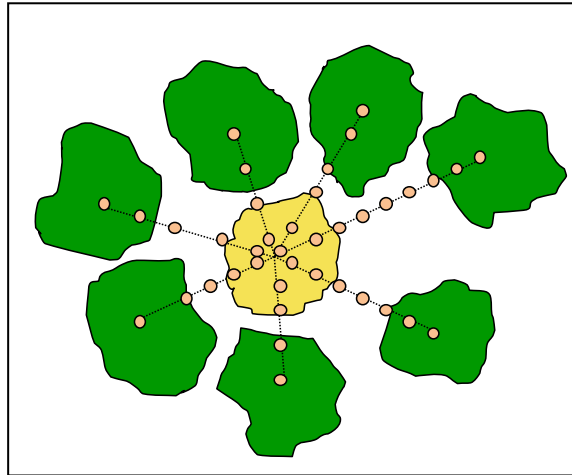


Abb. 7: Schematische Darstellung der Anlage von Transekten, auf denen die Probepunkte (orange) angeordnet sind (nicht maßstabsgetreu)

In Wäldern treten sehr oft kleinräumliche Standortsunterschiede auf, die auch für das Untersuchungsgebiet der vorliegenden Arbeit typisch sind. Die verschiedenen Baumarten besiedeln aufgrund mannigfaltiger Ansprüche und Konkurrenzen unterschiedliche Standorte im Wald (vgl. z. B. BREEMEN et al. 1997; FINZI et al. 1998b). Die Fichten der Untersuchungsflächen dieser Arbeit wurden gepflanzt. Im Gegensatz dazu haben sich die Birken im Bestand natürlich angesiedelt. Auf der Untersuchungsfläche der vorliegenden Arbeit wies der Boden in den größeren Mischungsformen von Birke (z. B. Trupps oder Gruppen) höhere Skelettgehalte auf. Mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit sind dort die angepflanzten Fichten ausgefallen und die Birke konnte sich natürlich verjüngen. In Fichtenbeständen nutzt die Birke existierende Lücken, um sich zu etablieren (HUTH 2002; HUTH und WAGNER 2008; HUTH 2009). Diese Partien wurden deshalb nicht für die Arbeit herangezogen, denn es ist eindeutig nachgewiesen, dass die abiotische Heterogenität beispielsweise einen Anteil an der Variabilität der Bodenvegetation hat (z. B. STRANDBERG et al. 2005). In Bereichen, in denen die Birke einzelbaumweise in den Fichtenbestand eingemischt ist, fanden sich unter beiden Baumarten ähnliche Skelettgehalte (nicht im Ergebnisteil dargestellt). Insofern ist von annähernd gleichen Standortbedingungen auszugehen und Baumarteneffekte können aus dieser Sicht herausgearbeitet und diskutiert werden. Außerdem ist es sehr wichtig, die Wirkung der verschiedenen Baumarten auf die Strauch-, Kraut- und Moosschicht von den Effekten der durchgeführten waldbaulichen Maßnahmen, zum Beispiel in Bezug auf die Artenanzahl, zu trennen. Nachgewiesen ist, dass unterschiedliche Hiebsmaßnahmen einen starken Einfluss auf die Strauch- und Krautschicht haben (u. a. HEINRICHS und SCHMIDT 2009). Alle Untersuchungsflächen wurden gleich behandelt, da sie in einem Untersuchungsbestand liegen. So kann auch der Effekt der waldbaulichen Behandlung ausgeschlossen werden.

Insgesamt muss an dieser Stelle gesagt werden, dass die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse natürlich höher wäre, wenn die Aufnahmen für diese Arbeit nicht nur in einem Bestand sondern in mehreren Beständen auf verschiedenen Standorten stattgefunden hätten. Durch die Konzentration auf einen Bestand konnte allerdings die Intensität der Aufnahmen sowie die statistische Absicherung erhöht werden. Überdies war es auch sehr schwierig, überhaupt einen geeigneten Bestand im Erzgebirge zu finden (vgl. dazu Kap. 2.3 und 6).

#### **3.2 Datenanalyse**

Die Daten der meisten erhobenen Parameter werden in dieser Arbeit drei Straten zugeordnet:

Birke

Fichte-Birke

Fichte

Die Einteilung der Straten erfolgt ausschließlich anhand der Kronenausbildung mit den Daten, die aus der Kronenablotung gewonnen wurden. Dabei liegen Punkte, die sich direkt unter einer Birkenkrone befinden, im „Birken-Stratum“. Punkte unterhalb einer Fichtenkrone werden dem „Fichten-Stratum“ zugeordnet. Liegen Punkte zwischen einer Birkenkrone und einer Fichtenkrone bzw. im Überlappungsbereich, werden sie dem „Fichten-Birken-Stratum“ zugeteilt. Diese Einteilung erfolgt auf Grund der Tatsache, dass die Krone direkt die Umweltvariablen beeinflusst, die auf den Oberboden wirken. Das betrifft z. B. den durchtropfenden und durchfallenden Niederschlag. Doch weil noch mehr Variablen als diese beiden genannten die Oberbodeneigenschaften beeinflussen, sind Streuungen innerhalb der Straten zu erwarten. Um diese zu erklären, werden die erhobenen Daten nicht nur nach Straten ausgewertet, sondern auch abstandsabhängig beschrieben.

Zukünftig können derartige Ergebnisse dazu dienen, ein Modell zu entwickeln, das die Mannigfaltigkeit der möglichen Kombinationen der Umweltfaktoren berücksichtigt (Abb. 8).

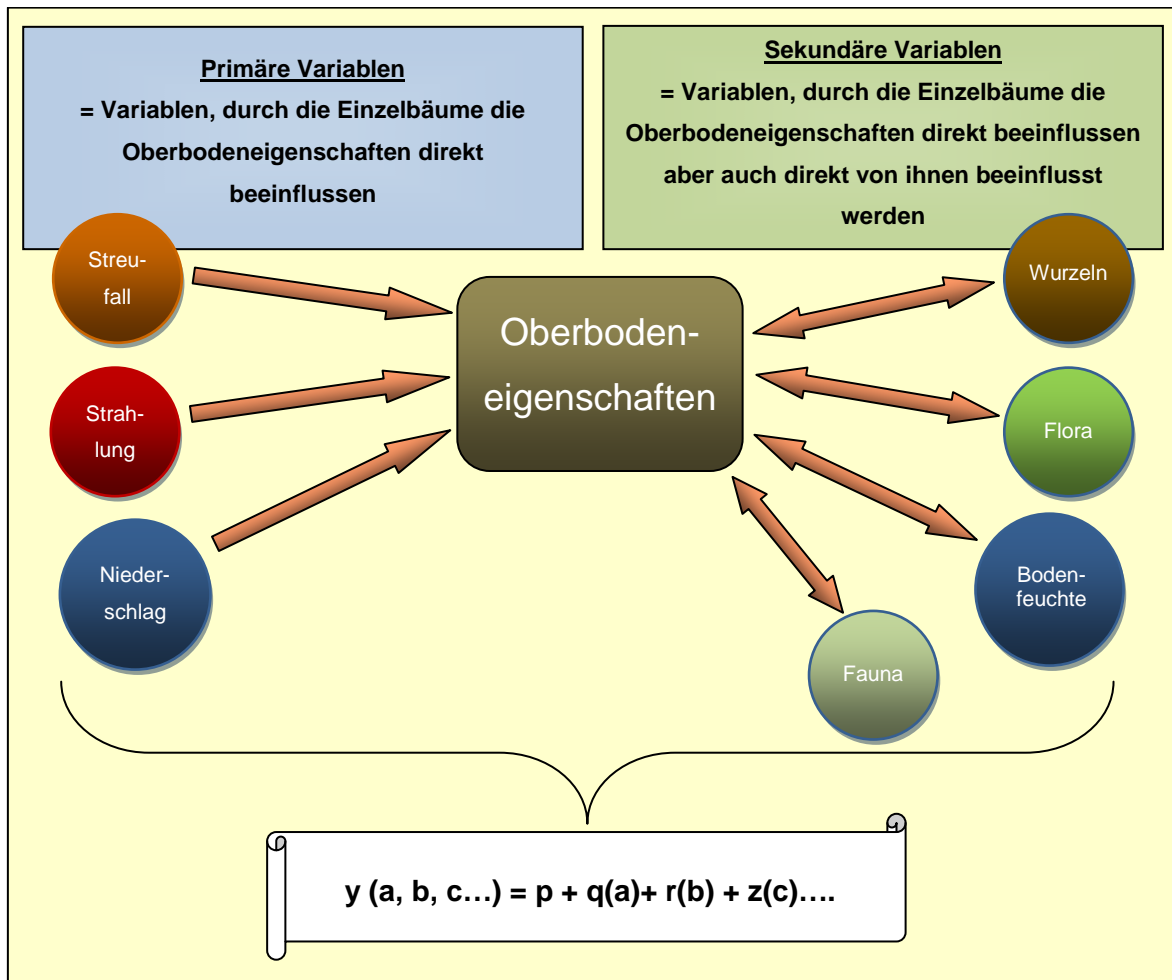


Abb. 8: Schema für ein multiples Modell

Nicht jede in Abb. 8 dargestellte Variable konnte in dieser Arbeit messend berücksichtigt werden, da das Hauptaugenmerk auf die Oberbodeneigenschaften gelegt wurde. Die Erfassung sämtlicher Einflussgrößen ist so umfangreich und komplex, dass sie nicht alle-samt durch eine Arbeit abgedeckt werden können. Für Variablen, die nicht gemessen wurden, werden für die Diskussion (Kap. 5.3) andere Arbeiten herangezogen und zitiert (z. B. Durchwurzelung).

Betrachtet man nur eine Variable (z. B. den Streufall), ist zu erwarten, dass es Streuungen innerhalb der drei Straten gibt. Dies ist u. a. durch die unterschiedlichen Streuverhältnisse bedingt. Beispielsweise kann das Verhältnis von Birken- zu Fichtenstreu an einem Probepunkt, der dem Birken-Stratum zugeordnet wird, 50:50 lauten, es können aber auch Punkte mit 30:70 bzw. 70:30 auftreten. Die Einteilung der drei Straten verfolgt also lediglich den Zweck, herauszuarbeiten, ob innerhalb kleiner Waldstrukturen Unterschiede verschiedener Oberbodenparameter festzustellen sind. Der Ansatz des multiplen Modells

hingegen ermöglicht zusätzlich eine detailliertere Ursachenforschung und Erklärung größerer Streuungen in den drei Straten.

Um mögliche Unterschiede zwischen diesen Straten statistisch zu belegen, ist es zuerst notwendig, die Stichproben auf Normalverteilung zu testen. Dazu erweist sich der Shapiro-Wilk-Test als sinnvoll, denn dieser hat für kleine Stichprobenmengen eine hohe Güte (LOZÁN und KAUSCH 1998).

In den meisten Fällen liegt keine Normalverteilung vor, weshalb in dieser Arbeit nur nicht-parametrische Signifikanztests angewendet wurden. Für die Beantwortung der Frage, ob es sich um abhängige oder unabhängige Stichproben handelt, sind zwei Gedanken wichtig: Zum einen existieren deutliche räumliche Abhängigkeiten der Untersuchungsvariablen. Andererseits geht es aber im statistischen Sinn vor allem darum, ob die Entnahme der einzelnen Probe die Ergebnisse der Entnahme der folgenden Proben beeinflusst (z. B. die Ergebnisse der Bodenchemie). Da dies nicht der Fall ist, werden die Stichproben als unabhängig behandelt. Durch die Unterstellung der Gleichheit der Verteilungsform ist es möglich, den H-Test von Kruskal und Wallis anzuwenden. Mit Hilfe dieses Tests sollte hier ermittelt werden, ob die festgestellten Unterschiede zwischen den drei Straten: Bi, FiBi und Fi signifikant sind. Bei einem signifikanten Ergebnis mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % wurde geprüft, wie sich dieses Ergebnis nach Tab. 6 einteilen lässt.

Tab. 6: Einteilung der Signifikanzwerte

p-Wert	Signifikanz	Symbol
$p \leq 0,001$	höchst signifikant	***
$p \leq 0,01$	sehr signifikant	**
$p \leq 0,05$	signifikant	*
$p > 0,05$	nicht signifikant	n. s.

Treten keine signifikanten Befunde mit  $\alpha = 0,05$  auf, wird erneut kontrolliert, ob diese auch bei  $\alpha = 0,10$  nicht signifikant sind.

Außerdem wurde der erweiterte Median-Test angewendet. Er dient dazu, die Ergebnisse des H-Tests zu validieren (vgl. LOZÁN und KAUSCH 1998). Je größer der Unterschied in den Verteilungsformen der Stichprobengruppen ist, desto unzuverlässiger werden die im H-Test verwendeten Signifikanzschranken (LORENZ 1996). Der erweiterte Mediantest umgeht dieses Problem, hat allerdings bei Normalverteilung nur eine asymptotische Effizienz von 64 % im Gegensatz zum H-Test und U-Test mit 95 % (SACHS 1999). Deshalb

dient der Mediantest in dieser Arbeit nur zur Kontrolle hochsignifikanter Befunde (SACHS 1999).

Ist  $\hat{H}$  auf dem gewählten Niveau statistisch signifikant, so ist festzustellen, welche Grundgesamtheiten differieren. Gemäß SACHS (1999) ermöglichen es die paarweisen Vergleiche der mittleren Ränge durch den  $\chi^2$ -Ansatz herauszufinden, zwischen welchen Grundgesamtheiten ein signifikanter Unterschied besteht.

#### Multivariate Ordination

Die *Multivariate Ordination* fand für die Ergebnisse der Bodenanalysen sowie der Vegetationsaufnahmen Anwendung. Die Daten wurden also in diesem Fall transektunabhängig ausgewertet. Dazu konnten die 120 Oberbodenproben (40 Of-Lage, 40 Oh-Lage und 40 A-Horizont) und die 155 Vegetationsaufnahmen (99 in Mischung von Birke und Fichte und 56 in reiner Fichte) analysiert werden. Für diese Arbeit wurde eine indirekte und lineare Gradientenanalyse und zwar die **Principal Component Analysis (PCA)** angewendet. Die Entscheidung für ein lineares Ordinationsmodell fiel nach der **Detrended Correspondence Analyse (DCA)**. Dargestellt werden in den Ordinationsdiagrammen nur die ersten beiden Achsen, da sie den größten Anteil der Varianz in den Datensätzen erklären. Für die standardisierten Werte sind zusätzlich Ordinationsdiagramme der 1. und 3. Achse abgebildet. Die Varianzen des Datensatzes, die durch die Achsen erklärt werden, sind in den Tabellen unter dem jeweiligen Ordinationsdiagramm aufgeführt. Die Aufnahmeorte sind in den Ordinationsdiagrammen als Kreise (drei Baumartenstraten) und die Sippen bzw. bodenchemischen Kennwerte als Pfeile sichtbar gemacht. Die Länge des Pfeils und der Winkel zur Ordinatenachse geben Auskunft über den Bedeutungswert der Art bzw. des bodenchemischen Kennwertes, welcher mit längerem Vektor bzw. kleinerem Winkel zunimmt (HAKES 1996). Die PCA setzt voraus, dass alle Variablen annähernd normalverteilt sind. Diese Bedingung kann für die vorliegenden Vegetations- und Bodendaten nicht erfüllt werden. Es ist sehr häufig, dass ökologische Daten nicht normalverteilt sind, beispielsweise durch die Seltenheit vieler Arten, während einige wenige oft zur Dominanz gelangen (LEYER und WESCHE 2007). Deshalb könnten viele uni- oder auch multivariate Verfahren für ökologische Fragestellungen nicht verwendet werden. Um die Daten aber anschaulich auswerten zu können, wird dennoch die PCA in dieser Arbeit ergänzend angewendet. Sie ist ein gebräuchliches Instrument der Datenauswertung in der Vegetations- und Bodenkunde. Eine Möglichkeit, dem Problem der nicht vorhandenen Normalverteilung zu begegnen, ist die Transformation. Zwar wurden für die betreffenden Daten Trans-

formationen ausprobiert, doch führten diese zu keinen wesentlichen Veränderungen der PCA-Ergebnisse. Die Daten für die Berechnung sind demnach nicht transformiert. Weil ein Mächtigkeitsunterschied zwischen den Arten/Sippen der Bodenvegetation bzw. ein Gehaltsunterschied zwischen den Elementen einen Einfluss auf die Ergebnisse der PCA hat, werden sowohl die Berechnungen mit absoluten Daten als auch mit den standardisierten Werten dargestellt. Die Ergebnisse aus den Berechnungen mit den absoluten Werten erlauben die größere Einwirkung der dominanten Arten/Sippen sowie der Elementgehalte, die dann die Ergebnisse der PCA sehr stark beeinflussen, zu berücksichtigen. Durch die zusätzliche Darstellung der Berechnungen mit den standardisierten Werten ist diese große Einflussnahme durch die dominanten Umweltgrößen reduziert.

#### Semivarianz

Um die Reichweite der räumlichen Abhängigkeiten festzustellen, wurden beispielhaft für die Of-Mächtigkeit Semivariogramme erstellt. Diese geostatistische Methode kann nur bei diskreten Abständen der Probepunkte berechnet werden, weshalb vor diesem Hintergrund nur die Daten der Horizontmächtigkeit und der Bodenvegetation dafür in Frage kommen. Die Mindestpunktanzahl für die Semivariogramme (35 Punkte nach WESSOLEK 2001) wird erfüllt, da Transekte mit gleicher Ausrichtung zusammengefasst werden konnten.

#### Auswertung der Zeigerwerte nach Ellenberg, der Sippenanzahl sowie der Deckungsgrade

Für die statistische Auswertung der Zeigerwerte nach Ellenberg, der Sippenanzahl sowie der Deckungsgrade werden u. a. von den einzelnen Aufnahmeflächen innerhalb der jeweiligen Straten Mittelwerte gebildet. Aus mehreren Gründen ist eine Auswertung dieser Daten mit Hilfe von Mittelwerten (z. B. mittleren Zeigerwerten) nach LANU LANDSH (2002) allerdings auch kritisch zu betrachten:

- Beispielsweise sind Feuchte-, Stickstoff- und Reaktionszahl nach ELLENBERG et al. (1992) eher ordinale Werte.
- Zeigerwerte werden nur ganzzahlig angegeben, durch die Mittelwertbildung ergeben sich aber häufig Dezimalstellen. Mit Hilfe der Rundung kann das Problem aber nicht gelöst werden, da dadurch erneute Zuordnungen zu den Zeigerwerten nicht immer eindeutig sind. Beispielsweise kann eine geringe Differenz von 0,2 zu einer Zuordnung zu zwei unterschiedlichen Zeigerwerten führen und so einen scheinbar markanten Unterschied suggerieren. Andererseits können große Unterschiede von 0,8 noch zu einer Zuord-

nung des gleichen Zeigerwertes führen, wie bei 3,6 und 4,4 (Beispiele nach LANU LANDSH 2002).

Trotz der Kritik an der Mittelwertbildung der Zeigerwerte (vgl. dazu auch DURWEN 1982 sowie KOWARIK und SEIDLING 1989) hat sich bei der Aufnahme mehrerer Aufnahmequadrate diese Herangehensweise aus praktischen Gründen in der Vegetationskunde etabliert.

#### **3.3 Messung der Strahlung**

Die Quantifizierung der Ressource Licht an einzelnen Punkten erfolgte mittels der Fish-eye-Methode. Die Prozedur beruht auf einer von WAGNER (1994) entwickelten Aufnahme- und Auswertungsmethodik. Grundlage dieser Technik ist eine digitale Spiegelreflexkamera (Nikon Coolpix 995) mit einem 180° Weitwinkelobjektiv (Brennweite von 8 mm). Sie wird auf einem Stativ fixiert über der Bodenvegetation installiert und nach Norden ausgerichtet. Außerdem sind diffuse Lichtverhältnisse, d. h. eine homogen geschlossene Wolkendecke bzw. die Morgen- oder Abenddämmerung notwendig. Die Fotos für die vorliegende Arbeit wurden in den Morgen- und Abendstunden aufgenommen. Gemessen werden konnte die Strahlung bei voller Belaubung Anfang Juli 2009 in einer Fläche, auf der einzelbaumweise Birken eingemischt sind (Abb. 9 und Tab. 7) und auf einer Fläche aus reiner Fichte (Abb. 10 und Tab. 8). Die Strahlungsmessungen für die reine Fichte mussten auf einer Referenzfläche vorgenommen werden, da die ursprüngliche Untersuchungsfläche, auf der z. B. die Bodenvegetation kartiert war, durch Schneebruch im anschließenden Winter 2008/2009 wegfiel. Insgesamt entstanden 40 Fotos, jeweils 20 Stück in dem Bereich, in dem einzelbaumweise Birken eingemischt sind (Abb. 9 und Tab. 7) und 20 in dem Bereich, in dem nur Fichten vorkommen (Abb. 10 und Tab. 8). Eine ausführliche Erläuterung zur Methodik der Feldaufnahmen (Belichtung) ist bei WAGNER (1995) zu finden.



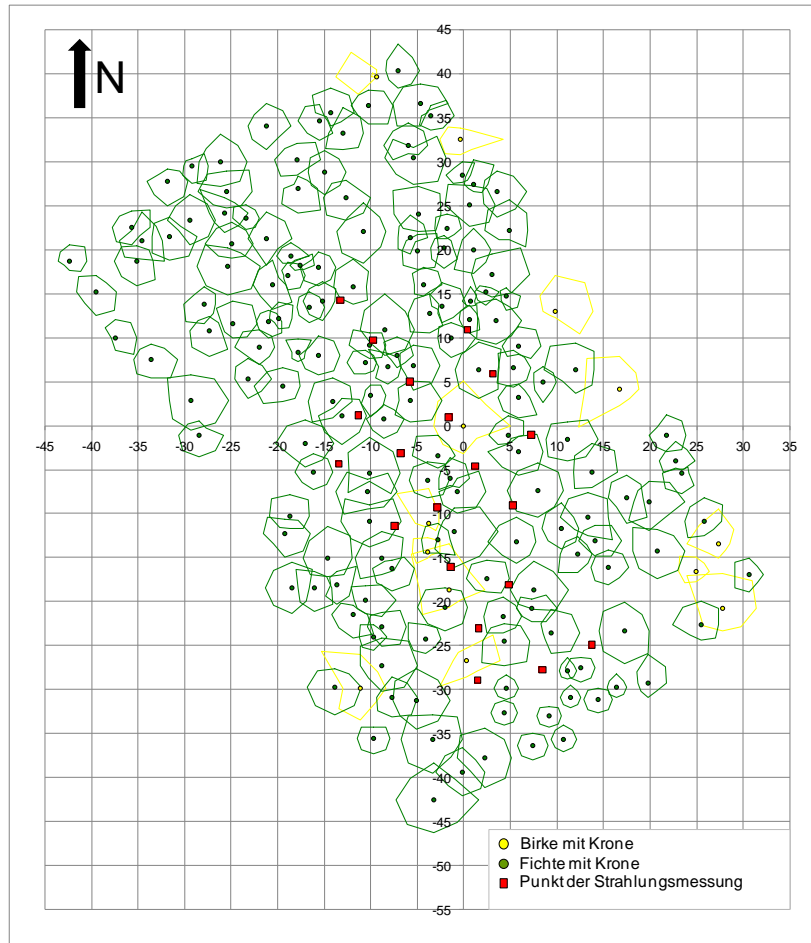


Abb. 9: Stamm- und Strahlungspunkteverteilungsplan bei einzelbaumweiser Einmischung von Birke in Fichte (nicht maßstabsgetreu)

Tab. 7: Beschreibung der Fichten-Birken-Fläche

Art	Alter [Jahre]	n/ha	BHD [cm]	Grundfläche [m <sup>2</sup> /ha]	Mischungsgrad	H/D-Verhältnis	Vorrat [m <sup>3</sup> /ha]	Kronenprozent
<b>Fichte</b>	60 bis 80	453	29	32,0	92,6	69	330	60
<b>Birke</b>	60	36	30	2,6	7,4	-	25	48

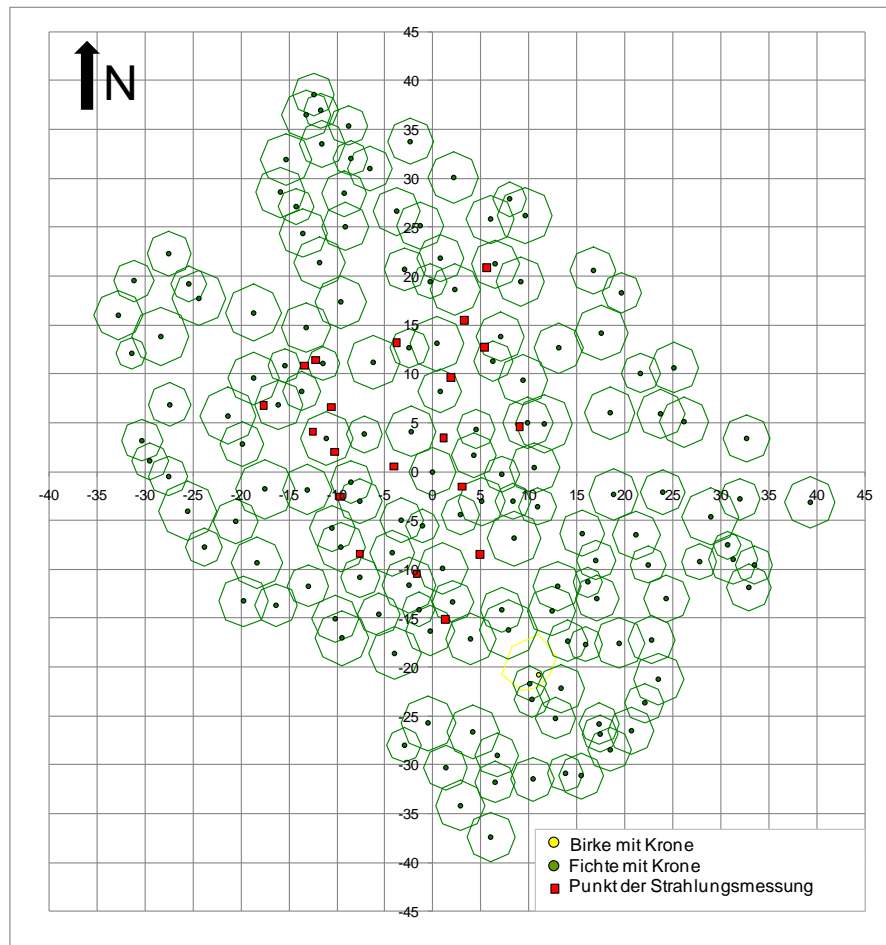


Abb. 10: Stamm- und Strahlungspunkteverteilungsplan der Fichtenfläche (nicht maßstabsgetreu)

Tab. 8: Beschreibung der Fichten-Fläche

Art	Alter [Jahre]	n/ha	BHD [cm]	Grundfläche [m <sup>2</sup> /ha]	Mischungs-grad	H/D-Verhältnis	Vorrat [m <sup>3</sup> /ha]	Kronen-prozent
<b>Fichte</b>	60 bis 80	452	32	37,2	99,3	70	409	62
<b>Birke</b>	60	3	18	0,07	0,7	-	0,5	(40)

Die Auswertung der hemisphärischen Fotos erfolgte mit dem Bildbearbeitungsprogramm „Optimas 6.5“ und einem von WAGNER (1998) entwickelten Makro. Dabei sind der freie Himmel schwarz und Strukturen, die Licht abschirmen, weiß dargestellt. Anhand der Grauwertabstufungen konnte nun jedem Pixel eine Transmissionseigenschaft zugeordnet werden. Diese wurde gewichtet von „0“ = vollkommen verdeckt bis „1“ = freier Himmel (WAGNER 1998). Als Resultat lieferte das Makro unter anderem die Diffuse Strahlung (DIFFSF) im Bezug zum Freiland, sowie die aus der Sonnenbahn berechnete Globale Gesamtstrahlung und PAR-Strahlung (Photosynthetic Active Radiation) für wolkenbedeckten und wolkenfreien Himmel. In diesem Zusammenhang werden im Ergebniskapitel Ab-

kürzungen für die einzelnen Größen verwendet, deren Bedeutungen in Tab. 9 erläutert sind:

Tab. 9: Ermittelte Größen zur Charakterisierung des Strahlungsangebotes (vgl. Darstellung bei WAGNER 1995)

<b>PARDIRS</b>	direkte PAR bei wolkenfreiem Himmel
<b>PARDIFS</b>	diffuse PAR bei wolkenfreiem Himmel
<b>PARGESS = PAR<sub>wolkenfrei</sub></b>	gesamte PAR bei wolkenfreiem Himmel = PARDIFS + PARDIRS
<b>PARDIFW = PAR<sub>bewölkt</sub></b>	gesamte PAR bei homogen bewölktem Himmel
<b>GLOB</b>	Globale Gesamtstrahlung
<b>GLOBDIFS</b>	diffuse GLOB bei wolkenfreiem Himmel
<b>GLOBDIFW</b>	gesamte GLOB bei homogen bewölktem Himmel
<b>GLOBDIRS</b>	direkte GLOB bei wolkenfreiem Himmel
<b>GLOBGESS</b>	gesamte GLOB bei wolkenfreiem Himmel
<b>PAR</b>	photosynthetisch aktive Strahlung
<b>PARSF = par %</b>	PAR Site Factor = in Relation zu einer Freifläche angegebene PAR-Strahlung, die auch als „relativer Lichtgenuss“ bezeichnet wird (PARSF = PAR <sub>Wetter</sub> Bestand/PAR <sub>Wetter</sub> Freifläche)
<b>PAR<sub>Wetter</sub> = PAR<sub>real</sub></b>	PAR <sub>bewölkt</sub> * (Wolkenanteil) + PAR <sub>wolkenfrei</sub> * (1 - Wolkenanteil)

Für die Berechnungen mit dem Makro waren die geografische Lage der Versuchsfläche, der zu beobachtende Zeitraum (01.05.2009 - 01.09.2009; 121. Tag - 243. Tag eines Jahres) sowie ein Intervall für die Berechnung der Sonnenbahn (zeitliche Auflösung 5 Tage aller 20 Minuten) notwendig. Zur Ermittlung des PAR<sub>Wetter</sub>-Wertes wurden für den Untersuchungszeitraum 30 % wolkenfreie Tage und 70 % bewölkte Tage unterstellt. Die Berechnung des PARSF-Wertes erfordert den PAR<sub>Wetter</sub>-Wert der Freifläche. Auf der Grundlage eines komplett schwarzen Bildes wurden die dafür erforderlichen Daten der Freifläche durch das Modell generiert. Der in Kap. 4.1 angegebene Freiflächenwert entstammt demzufolge keinen Messungen über dem Bestand, sondern ist als Durchschnittswert für die spezifische Lage der Versuchsfläche im betrachteten Zeitraum angegeben.

Durch das Strahlungsmodell „tRAYci“ (BRUNNER 1998 und 2005) war es möglich, das Strahlungsangebot unter Baumkronen zweidimensional bzw. dreidimensional zu simulieren und Strahlungskarten für die Untersuchungsflächen zu erstellen.

Für die reine Fichtenfläche wurden die Stammkoordinaten sowie die BHD's gemessen. An 45 Bäumen erfolgte zusätzlich eine Messung der Baumhöhe und der Kronenansatzhöhe. Es wurde repräsentativ für dunklere und hellere Partien des Fichtenbestandes gemessen. Mit Hilfe dieser 45 Bäume konnten die für tRAYci notwendigen Einzelbaumkennwerte, wie der Kronenradius, die Baumhöhe und der Kronenansatz mit Hilfe von Schätzfunktionen für alle Bäume hergeleitet werden. Die fehlenden Höhenwerte ließen sich mit Hilfe einer Bestandeshöhenkurve ermitteln. Dies erfolgte durch ein Programm zur Erstellung von Höhenkurven und Schätzung fehlender Höhenwerte, das Teil der Forstlichen Software Sammlung ForestTools2 (NAGEL 2006) ist. Genutzt werden dabei die von SCHMIDT (1968) beschriebenen Ausgleichsfunktionen. Für das Datenergänzungsmodul war es notwendig, die verschiedenen Bestandeshöhenkurvenfunktionen zu linearisieren. So konnten die Daten nach der Methode der kleinsten Quadrate angepasst werden. Für die Fichtenfläche zeigte eine Parabelfunktion die geringste mittlere quadratische Abweichung:

Formel 1: Bestandeshöhenkurvenfunktion (Gültigkeitsbereich:  $14 \leq d \leq 50$  cm)

$$\text{Parabel } h = 11,8059 + 0,3917 * \text{BHD} - 0,0027 * \text{BHD}^2$$

Dabei bedeuten:

**h** ... Baumhöhe [m]

**BHD** ... Brusthöhendurchmesser [cm]

Die fehlenden Kronenradien wurden durch die folgende Formel für Fichte (DÖBBELER et al. 2007) ergänzt.

Formel 2: Gleichung zur Berechnung des Kronenradius

$$\text{Kronenradius} = 0,5 * (1,2644 + 0,1072 * \text{BHD}) * \left(1 - e^{-\left(\frac{\text{BHD}}{0,000001}\right)^1}\right)$$

Die Ermittlung fehlender Kronenansätze war über die folgende Funktion nach DÖBBELER et al. (2007) möglich, die mit Hilfe des Statistikprogrammes CoStat durch die Standardeinstellung für eine nichtlineare Regression für den Bestand angepasst werden konnte:

Formel 3: Gleichung zur Berechnung des Kronenansatzes

$$\text{Kronenansatz} = h * (1 - e^{-\text{abs}\left(2,32976988892 - 0,32687096074 * \frac{h}{\text{BHD}} + 0,01874635477 * d - 1,1596983877 * \ln(H100)\right)})$$

Auf der Fichten-Birken-Fläche wurden alle Baumparameter (Stammkoordinaten, BHD, Kronenradien in acht Himmelsrichtungen, Kronenansatz und Baumhöhe) gemessen. Das war nötig, da sich bei Anwesenheit von Birken beispielsweise die Fichtenkronenansatzwerte verändern. Im Vergleich zum Fichtenreinbestand können sie sich erhöhen, da mehr Licht zur Ausbildung der Fichtenkronen zur Verfügung steht.

Als Basis für die Kalibrierung des Modells tRAYci dienen die aufgenommenen Ergebnisse der Fisheye-Foto-Auswertung. In den Anlagen 7 und 8 sind die verwendeten Eingangsgrößen für tRAYci aufgeführt. Modelliert wurde für die Periode vom 121. Tag bis zum 243. Tag eines Jahres. Das Modell berechnet den sogenannten PACL (Percentage of Light Above Canopy Level), der dem relativen Lichtgenuss entspricht. In allererster Linie musste auf die Plausibilität des Modells Wert gelegt werden. Um dennoch die Genauigkeit des Modells statistisch einschätzen zu können, half auch das Bestimmtheitsmaß. Während es aber z. B. bei Lochhieben möglich ist, die Genauigkeit der modellierten Werte in Bezug auf die gemessenen Werte in Form einer Regression zu bestimmen (NORDMANN 2006), ist dies bei den vorliegenden Daten geschlossener Bestände schwerer möglich. Aufgrund der geringen Schwankung der Strahlungsdaten der Bestände im Vergleich zu Lochhieben, führten bereits geringe Unter- oder Überschätzung der Strahlungswerte durch das Modell zu einem niedrigen Bestimmtheitsmaß. Als Ergänzung zum Bestimmtheitsmaß wurde noch von jedem Wert des Modells die Standardabweichung  $\sigma$  zu seinem Komplementärpaar (Fisheye-Foto) gebildet und ein Mittelwert berechnet.

Um Aussagen zum photosynthetisch nutzbaren Strahlungsregime am Waldboden treffen zu können, wird der  $PAR_{\text{Wetter}}$ -Wert [Watt/m<sup>2</sup>] (oder auch  $PAR_{\text{real}}$ -Wert genannt) berechnet (Formel 4).

Formel 4: Gleichung zur Berechnung von PARWETTER

$$PAR_{\text{Wetter}} = (\text{Anteil der Sonnenstunden} \times \text{PARGESS}) + (\text{Bewölkungsanteil}_{\text{Wetter}} \times \text{PARDIFW})$$

Der PARGESS-Wert ergibt sich aus der folgenden Gleichung (Formel 5):

Formel 5: Berechnung der gesamten photosynthetisch aktiven Strahlung bei wolkenfreiem Himmel

$$\mathbf{PARGESS} = \mathbf{PARDIRS} + \mathbf{PARDIFS}$$

Für die Herleitung des  $\text{PAR}_{\text{Wetter}}$ -Wertes ist die Berechnung des Bewölkungsanteiles (Formel 6) notwendig.

Formel 6: Berechnung des Bewölkungsanteils

$$\mathbf{Bewölkungsanteil}_{\text{Wetter}} = 1 - \text{Anteil der Sonnenstunden}$$

#### **3.4 Ansprache der Bodenvegetation**

Die Erhebung und Auswertung der Daten der Bodenvegetation war durch die Betreuung einer Masterarbeit (TISCHER 2009) möglich. Aufgrund der guten Eignung der Bodenvegetation als Standortszeiger lag es nahe, auch diese als einen Indikator für die räumliche Veränderung von Standortverhältnissen heranzuziehen. RASPE und FEGGER (1997) wiesen nach, dass sich die Witterungsverhältnisse vor allem auf die Streu nahe der Bodenoberfläche auswirken und dass dabei die Bodenvegetation als Feuchtepuffer eine Rolle spielt (vor allem die Moosschicht). Abb. 11 und Abb. 12 zeigen die Transektpunkte, auf denen die Bodenvegetation erfasst wurde.

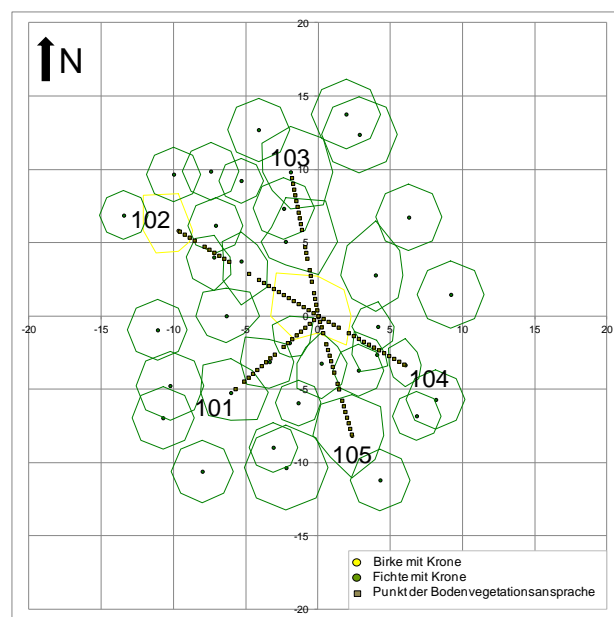


Abb. 11: Stamm- und Probepunkteverteilungsplan für die Bodenvegetationsansprache bei einzelbaumweiser Einmischung von Birke in Fichte mit den Transektnummern 101 bis 105 (nicht maßstabsgetreu)

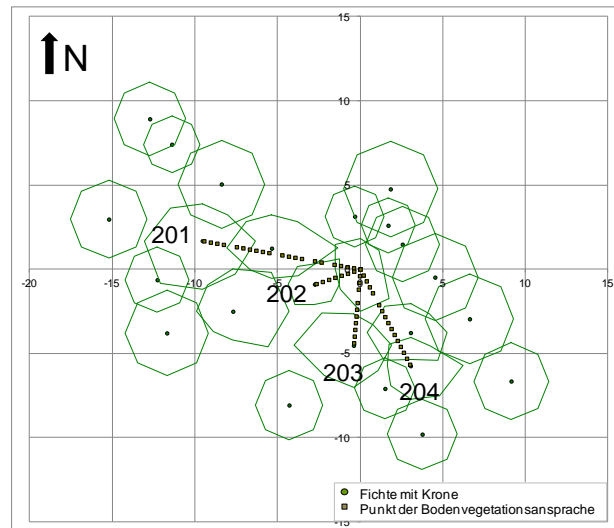


Abb. 12: Stamm- und Probepunkteverteilungsplan für die Bodenvegetationsansprache in reiner Fichte mit den Transektnummern 201 bis 204 (nicht maßstabsgetreu)

Die Ansprache der Bodenvegetation erfolgte im Sommer 2008, da die Bestände nicht reich an Geophyten sind und somit keine zweimalige Vegetationsaufnahme (Frühling und Sommer) notwendig ist. Dazu wurde ein quadratischer Holzrahmen (Abb. 13) mit einer Fläche von  $A = 0,16 \text{ m}^2$  auf den Probepunkt (= Mittelpunkt des Aufnahmequadrates) gelegt. Angesprochen sind Arten, Artenanzahl und Deckungsgrade.



Abb. 13: Rahmen zur Unterstützung der Vegetationsansprache  
(Ansprache auf  $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ )

Dabei kam eine Kombination von Individuenanzahl (Abundanz) und Deckungsgrad (Dominanz) zur Anwendung. Aus Tab. 10 ist die sich daraus ergebende Artmächtigkeitsskala zu entnehmen. Allgemein ist anzumerken, dass Mengenangaben zu den einzelnen Arten einen groben Eindruck über die Dominanz der einzelnen Arten in den Aufnahmeflächen vermitteln sollen. Aus ökologischer Sicht ist dies oft bedeutungsvoller als eine kleinflächig präzise angegebene Deckungsfläche. Die Spalte Transformation bezieht sich auf die für die Analyse mit CANOCO notwendige Umwandlung der Artmächtigkeitssymbolik in metri-



sche Werte. Die Nomenklatur der Gefäßpflanzen richtet sich nach ROTHMALER (2002), die der Moose in Anlehnung an MÜLLER (2008) nach MEINUNGER und SCHROEDER (2007).

Tab. 10: Mengenangaben in den vegetationskundlichen Aufnahmen  
(nach FISCHER 2002, verändert)

Symbol	Transformation	Individuenanzahl	Deckungsprozente
+	0,5	1	≤5 %
1	1	2-10	≤5 %
2m	1,5	11-25	≤5 %
2a	2	beliebig	>5-15 %
2b	3	beliebig	>15-25 %
3	4	beliebig	>25-50 %
4	5	beliebig	>50-75 %
5a	6	beliebig	>75-95 %
5b	7	beliebig	>95 -100 %

Es ist auch interessant zu analysieren, auf wie viel Prozent der Aufnahmeflächen eine Sippe<sup>1</sup> vorkommt (relative Stetigkeit). Dieses Kriterium dient dazu, zu erkennen, ob die einzelnen Straten sich hinsichtlich der Sippenzusammensetzung bzw. des Vorkommens bestimmter Sippen unterscheiden. Tab. 11 zeigt die verwendete Einteilung in Stetigkeitsklassen.

Tab. 11: Tabelle zur Bestimmung der Stetigkeit von Sippen

Symbol	Stetigkeit
r	nur einmal
+	mehrmals bis 5 %
I	5 % bis 20 %
II	21 % bis 40 %
III	41 % bis 60 %
IV	61 % bis 80 %
V	81 % bis 100 %

Zur Untersuchung von baumarten- und distanzabhängigen Wirkungen auf die Bodenvegetation wurden insgesamt neun Transekte angelegt. Nach DIERSCHKE (1994), KENT und

---

<sup>1</sup> Neben dem Artbegriff wird in dieser Abhandlung auch der Begriff Sippe verwendet. Durch den Begriff der Sippe werden die taxonomischen Ränge der Arten, intraspezifischen (Unterarten, Varietäten, Formen) und interspezifischen (Bastarde) Sippen zusammengefasst (SCHMIDT 2000). Spricht nichts gegen die Anwendung des Artbegriffes, dann wird auch dieser in der Arbeit genutzt.

COKER (1999) sowie FISCHER (2002) bietet sich für die Analyse von standörtlichen und floristischen Gradienten die Transektmethode an. Einen Überblick über die Dimensionen der Transekte gibt Tab. 12.

Tab. 12: Bezeichnung der Transekte, sowie deren Länge und Probepunkteanzahl

Bestandessituation	Transektbezeichnung	Länge [m]	Punktanzahl
Fichte	1 Fi	9,6	21
	2 Fi	2,8	8
	3 Fi	4,4	11
	4 Fi	6,4	16
Fichte-Birke	1 FiBi	7,6	18
	2 FiBi	11,2	24
	3 FiBi	9,6	21
	4 FiBi	6,8	17
	5 FiBi	8,4	19

Es fanden 99 Ansprachen in Mischung von Birke und Fichte statt. In der reinen Fichtenfläche waren es 56 Ansprachen. Für einige Auswertungen wurden die Punkte aus beiden Bestandessituationen für die drei Straten zusammengefasst. Daraus ergaben sich die in Tab. 13 ersichtlichen Probepunktanzahlen.

Tab. 13: Probepunkteanzahl der Bodenvegetationsansprache in den drei Straten

Stratum	Punktanzahl
Birke	32
Fichte-Birke	67
Fichte	56

### **3.5 Erfassung der Streumenge und -verteilung**

In Mischbeständen entstehen durch die Kronen von Einzelbäumen komplexe räumliche Muster von Streuquantität und -chemie (z. B. EDMONDS et al. 1991; v. WILPERT und MIES 1995 zit. n. ROTHE und BINKLEY 2001). Für die vorliegende Fragestellung war es deshalb unerlässlich, die Streumenge und -verteilung zu bestimmen. Denn an bestimmten Punkten im Bestand ergeben sich ganz spezifische Mischungsverhältnisse der Streu. Deshalb wurden entlang von Transekten 137 Streufänge aufgestellt (Abb. 14).



Abb. 14: Beispiel für die Anordnung der Streufänge entlang von Transekten

Der Radius der Fallennetze betrug 0,2575 m. Die Fallenstangen hatten eine Länge von 1,50 m und steckten ca. 30 cm tief im Boden. Auf diese Weise fand die Sammlung der Streu in einer Höhe von 1,20 m über dem Boden statt. Von den Bäumen und Fallen wurden sowohl die Entfernungen als auch die Winkel von einem Zentralbaum aus bestimmt, so dass die kartesischen Koordinaten ermittelt werden konnten. Das ermöglichte, Stamm- und Fallenverteilungspläne zu erstellen. Die Fallen wurden von September 2007 bis September 2008 periodisch geleert (Tab. 14). Dadurch konnte die Gesamtstreumasse der Birken für ein Jahr ergründet werden.

Tab. 14: Termine des Aufbaus und der Leerung der Streufänge

Fläche	a (Birke in Fichte)	b (Fichte in Birke)
Aufbau der Streufänge	17.09.2007	17.09.2007
Leerungstermine	23.10.2007	02.11.2007
	18.12.2007	18.12.2007
	06.06.2008	06.06.2008
	15.09.2008	15.09.2008

Im Labor wurde die Birkenblattstreu von der Fichtennadelstreu getrennt und nach Trocknung bei 60° C gesondert eingewogen. So wird die Flussdichte der Blattmasse pro Quadratmeter über das Jahr mit Hilfe der Fallen bestimmt (z. B. STAELENS et al. 2003). Hieraus lässt sich die Streuanlieferung beider Baumarten in ihren jeweiligen Mischungsverhältnissen für konkrete Punkte ableiten. Außerdem war es so möglich, die jährlich anfallenden Streumassen für Einzelbäume aber auch für den gesamten Bestand zu quantifizieren.

Mit Hilfe der ermittelten kartesischen Koordinaten konnten Verteilungspläne der Fallen und Bäume, von denen Streu in die Fallen gelangt, erstellt werden (Abb. 15 für die Fallen der Fläche a und Abb. 16 für alle Fallen, d. h. für Flächen a und b).

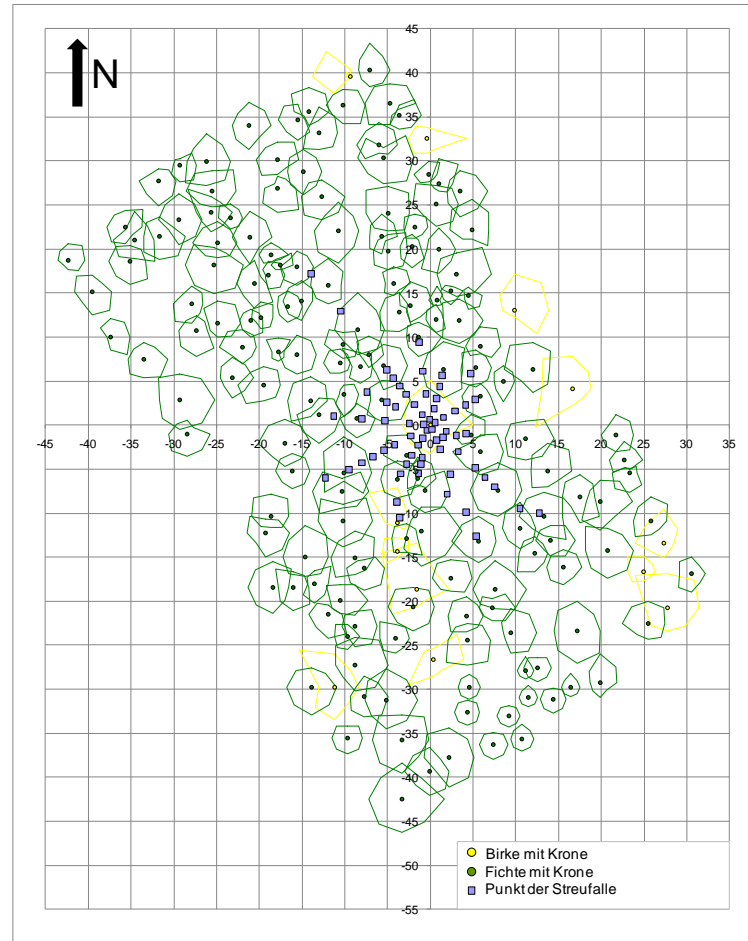


Abb. 15: Stamm- und Streufallenverteilungsplan bei einzelbaumweiser Einmischung von Birke in Fichte (nicht maßstabsgetreu)

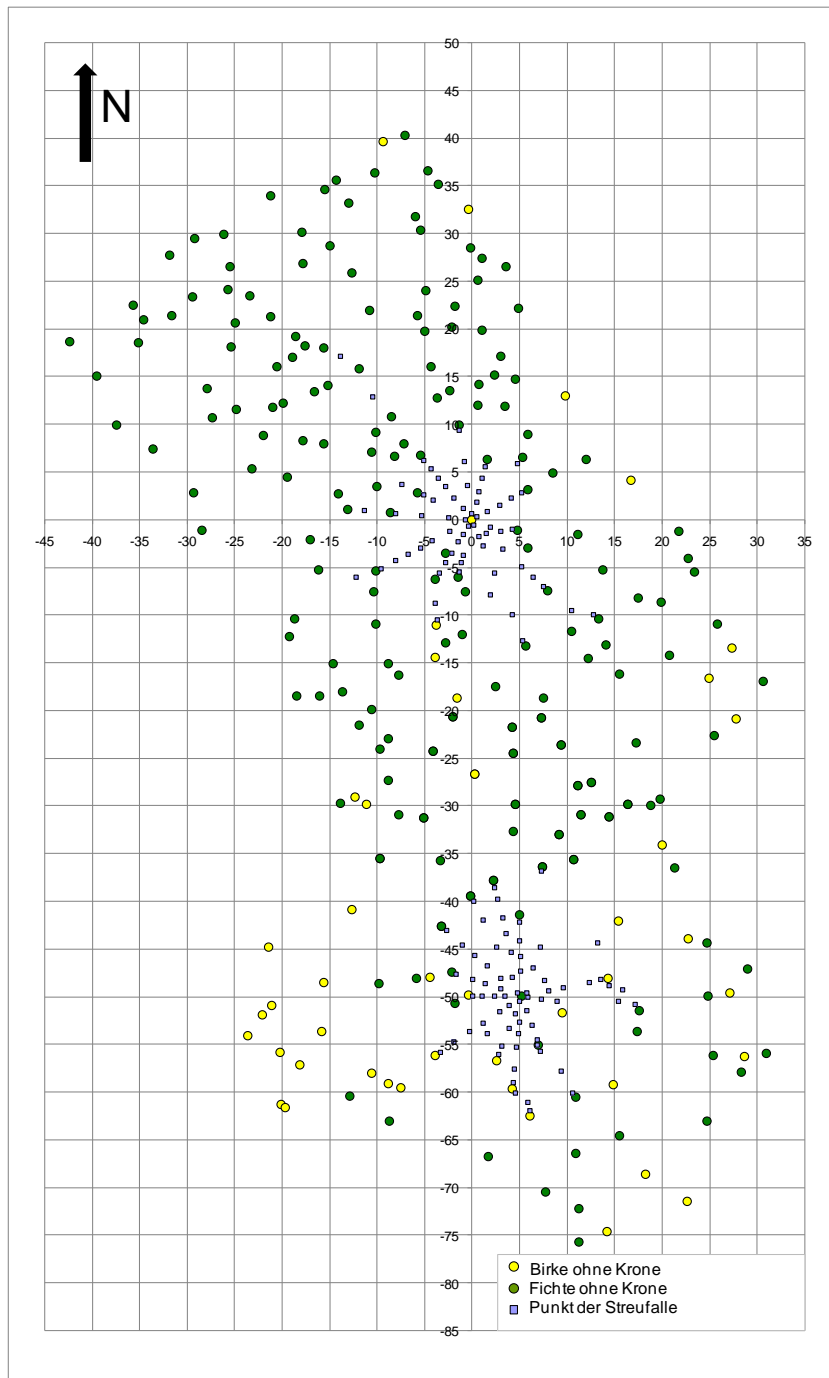


Abb. 16: Erweiterter Stamm- und Fallenverteilungsplan (nicht maßstabsgetreu)

Um passende Modelle für die einzelnen aufgenommenen Parameter (z. B. Verteilung der Streu um den Einzelbaum) zu entwickeln, kommt das Programm „WaldStat 7.0“ zur Anwendung. Dieses Programm wurde an der Technischen Universität Dresden am Lehrstuhl für Waldbau unter Herrn Prof. Wagner in Kooperation mit Herrn Prof. Näther von der Technischen Universität Freiberg erarbeitet. WaldStat findet z. B. auch für die Modellierung von Diasporenverteilungen Anwendung (WAGNER 1997; WAGNER et al. 2004).

Dabei wird der einzelbaumorientierte Ansatz der „Theorie ökologischer Felder“ (z. B. WU et al. 1985; MOU et al. 1993) benutzt, der zunächst die Effekte des Einzelbaumes distanzabhängig erschließt und anschließend die Erweiterung auf die Bestandesfläche erlaubt („Vom-Punkt-auf-die-Fläche-Ansatz“). WU et al. (1985) gehen davon aus, dass im Bestand messbare Größen ihren Ursprung im Einzelbaum haben (z. B. Menge und Verteilung der Streu und Diasporen).

Methodische Umsetzungen des Konzeptes ökologischer Felder lassen sich unter dem Begriff der Likelihood-Modellierung oder Invers-Modellierung zusammenfassen. Durch Punktmessungen ermittelte Baumeffekte innerhalb beliebiger Bestandessituationen bedürfen eines räumlich-statistischen Ausgleiches, da tatsächlich erhobene Daten stets einem Konglomerat der Wirkung einer Vielzahl von umstehenden Bäumen entsprechen. Erst dadurch ist der tatsächliche Effekt eines Baumes quantifizierbar. Diesen räumlich-statistischen Ausgleich haben NÄTHER und WÄLDER (2003) mit Hilfe eines Poisson-Cluster-Punkt-Prozesses bereits durchgeführt.

In der Vergangenheit erwiesen sich vor allem Ergebnisse, die mit dem Lognormal-Modell modelliert wurden, für ökologische Fragestellungen als plausibel, z. B. für Verteilungen von Diasporen um den Einzelbaum (GREENE und JOHNSON 1989; WAGNER 1997; STOYAN und WAGNER 2001; HUTH 2009). Auch bezüglich der Streudistribution hat sich dieses Modell z. B. gegenüber dem RIBBENS-Modell bewährt (z. B. FRISCHBIER und ZEIBIG 2008). Denn das Lognormal-Modell zeigte sich als vorteilhafter hinsichtlich der Modellgüte und aus ökologischer Sicht plausibler.

Die folgende Beschreibung des Lognormal-Modells erfolgt anhand der Streuverteilung. Dabei steht die Variable  $r$  für die Distanz von der Blattquelle (Baumzentrum), folglich von dem Baum, von dem die Streu abgeworfen wird. Sie kann auch durch kartesische Koordinaten beschrieben werden. Die  $x$ - und  $y$ -Koordinaten treten also an die Stelle eines Wertes für  $r$ . Daher ist  $d(x,y) = d(r)$  oder  $p(x,y) = p(r)$ . Es ist wichtig, zwischen der Häufigkeitsfunktion und Intensitätsfunktion zu unterscheiden. Im isotropen Fall hängen die Dichtefunktionen  $p(x,y)$  und  $d(x,y)$  nur von der Distanz vom Baum ab und nicht von den Koordinaten. Nach WAGNER et al. (2004) stellen also die symmetrischen Kreise unterschiedliche Intensitäten der Blattverteilung (sozusagen Isolinien) dar (Abb. 17).

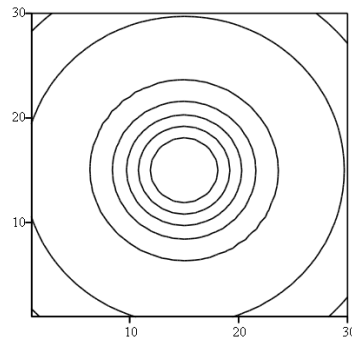


Abb. 17: Darstellung einer isotropen Verteilung mit Isolinien

Somit sind also beide Angaben über den Kreisumfang verknüpft und es gilt:

Formel 7: Verknüpfung über Kreisumfang

$$d(r) * 2 * \pi * r = p(r)$$

Dabei stellen  $d(r)$  die Intensitätsfunktion (z. B. Blatt- oder Nadelzahl/m<sup>2</sup>) und  $p(r)$  die Häufigkeitsfunktion (Zahl) dar (WAGNER 2005). Nach BATSCHELET (1981) sind bei Isotropie die Wahrscheinlichkeiten für die entfernungsabhängige Verteilung (in dieser Arbeit von der Streu) in jeder Richtung identisch.

Dem Lognormal-Modell liegt die folgende Lognormal-Dichtefunktion  $d(r)$  zugrunde:

Formel 8: Lognormal-Dichtefunktion

$$d(r) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma r)^{-\frac{(\ln r - \mu)^2}{2\sigma^2}}}}$$

Die mittlere Distanz  $\delta$  vom Baumzentrum kann mit

Formel 9: mittlere Distanz

$$\delta = \exp(\mu + \sigma^2/2)$$

beschrieben werden. Die entsprechende Punktwahrscheinlichkeit wird nun erfasst durch:

Formel 10: Punktwahrscheinlichkeit

$$p(r) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{3}{2}} \sigma r^2 \exp^{-\frac{(\ln r - \mu)^2}{2\sigma^2}}}$$

Um dem Modell eine baumindividuelle Einflussgröße zu geben, wurde nach RIBBENS et al. (1994) die folgende Formel integriert:

Formel 11: Berücksichtigung der Baumgröße durch den Brusthöhendurchmesser

$$g(dbh) = N * \left( \frac{dbh_{real}}{dbh_{ref}} \right)^\beta$$

Dieser Term beschreibt, wie sich die Blattmasse in Beziehung zum Brusthöhendurchmesser (BHD) entwickelt. Ist  $\beta$  beispielsweise 1, verhält sich der BHD zur Blattmasse linear; d. h., nimmt der BHD zu, steigt die Blattmasse dazu linear. Für  $\beta = 2$  wird bei zunehmendem BHD ein exponentieller (quadratischer) Anstieg der Blattmasse modelliert. Die Kombination des mittleren BHD als Referenz-BHD und des jeweiligen BHD der in die Betrachtung einbezogenen Einzelbäume ermöglicht also innerhalb der Funktion ein zusätzliches Wichten der Blattallometrie durch den Parameter  $\beta$ . In dieser Arbeit wird für den Parameter  $\beta$  für die Baumart Birke der Wert „zwei“ unterstellt. Dieser sehr einfache Fall, dass die Blatt-/Nadelmasse in Kombination mit dem BHD allometrischen Regeln folgt, wurde angewendet, um dem Modell nicht zu viele Eingangsparameter zu geben. Jeder weitere Parameter z. B. Baumhöhe, Kronenradius, Kronenlänge usw. würde das Modell noch komplexer machen und nicht zwingend zu einer höheren Genauigkeit führen. An dieser Stelle muss zwischen dem höheren Messaufwand und der praktischen Umsetzbarkeit dieses Modells abgewogen werden.

Zusammengefasst ergibt sich die folgende Lognormal-Funktion (Intensitätsfunktion):

Formel 12: Lognormal-Funktion mit individuellem Baumeinfluss

$$Dens(r, dbh) := \frac{e^{\left[ \frac{(\ln(r) - \mu)^2}{2 * \sigma^2} * (-1) \right]} * N * \left( \frac{dbh}{dbh_{ref}} \right)^\beta}{2 * \pi * r^2 * \sqrt{2 * \pi * \sigma^2}}$$

Um der Verteilung auch Richtungseffekte (z. B. Windrichtungseffekte bei der Streuverteilung) zuzuweisen, ist es in WaldStat möglich, dem Modell weitere Parameter hinzuzufügen. Ein Beispiel dafür ist die verwendete Mises-Verteilung (MARDIA und JUPP 2000).

Formel 13: Mises-Verteilung

$$f(\varphi) = \exp(k \cos(\varphi - u + \vartheta \sin(\varphi - u)))$$



Der Funktion werden für diesen sogenannten anisotropen Fall (Abb. 18) also noch die Anisotropieparameter  $k$ ,  $u$  und  $\vartheta$  zugewiesen (BATSCHELET 1981; STOYAN und WAGNER 2001; WÄLDER et al. 2009).

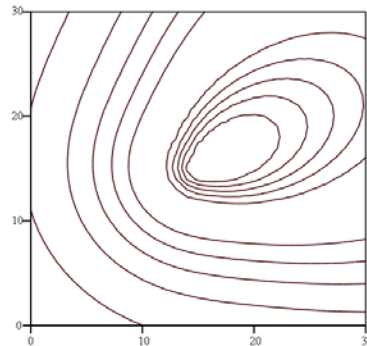


Abb. 18: Beispiel für anisotrope Verteilungen

Dabei bedeuten:

$\varphi$  ... Winkel, der dem Bereich zwischen dem Ablagerungspunkt der Streu (Standpunkt der Streufalle) und der Position der nächsten Birke bzw. Fichte, die Streu abwirft, entspricht

$k$  ... Intensität der Konzentration von Streu in einer bestimmten Richtung ausgehend vom Zentralbaum (wenn  $k = 0 \Rightarrow$  Isotropie)

$u$  ... Richtungswinkel

$\vartheta$  ... Richtungswinkel

Die sogenannte Abstandstransformation (Formel 14) dient zur Berechnung des Wertes  $r'$ , der dann in die Formel 12 einfließt.

Formel 14: Log-Normal-Modell mit integrierter Mises-Funktion

$$r'_{x,y} = r'_{x,y} e^{(k \cos(\varphi_{x,y} - u) + \vartheta \sin(\varphi_{x,y} - u))}$$

Für die Interpretation der Streumenge und -verteilung findet in dieser Arbeit die in WaldStat durchgeführte Berechnung der mittleren Ausbreitungsdistanz („**Mean Dispersal Distance**“ – **MDD**) als Maßzahl Verwendung. Sie kann ebenfalls für den isotropen bzw. anisotropen Fall berechnet werden (Formel 15 und Formel 16).

Formel 15: Berechnung der mittleren Ausbreitungsdistanz für den isotropen Fall

$$MDD_{iso} = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$$

Formel 16: Berechnung der mittleren Ausbreitungsdistanz für den anisotropen Fall

$$MDD_{aniso} = \frac{e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{e^{k \cos(\varphi_{x,y} - u + \vartheta \sin(\varphi_{x,y} - u))}} d \propto$$

Den grafischen Darstellungen in dieser Arbeit liegt die in Abb. 19a gewählte Gradeinteilung zugrunde, den Berechnungen mit WaldStat dagegen die aus Abb. 19b. Der Grund dafür ist, dass WaldStat auf Winkeln basiert, die im mathematischen Sinn definiert sind. Bezogen auf den Vollkreis bedeutet das also:

- $0 \pi$  bzw.  $2 \pi$  entsprechen  $0^\circ$  bzw.  $360^\circ$
- $\pi/2$  entspricht  $90^\circ$
- $\pi$  entspricht  $180^\circ$
- $3/2 \pi$  entsprechen  $270^\circ$

So ergibt sich die in der Mathematik übliche Gradeinteilung aus Abb. 19b.

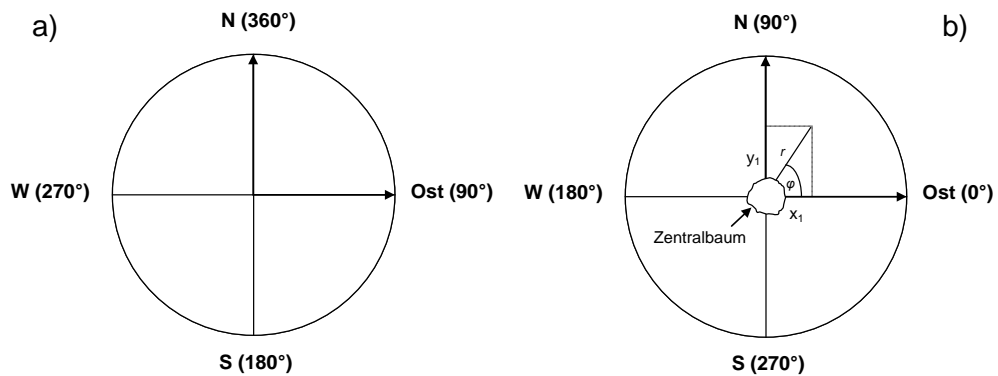


Abb. 19: a) Schematische Darstellung der üblichen Gradeinteilung nach Himmelsrichtungen und b) Schematische Darstellung für WaldStat verwendete mathematische Betrachtung (zirkuläre Statistik) im zweidimensionalen Raum, ausgehend von der Position eines Zentralbaumes und der davon abhängigen Ablagerungsposition der Streu (Ausbreitungsdistanz  $r$  und Ausbreitungsrichtung definiert durch  $\varphi = \phi$ )

Um dabei das optimale Modell zu finden, wurde neben der Korrelation nach PEARSON auch Akaikes Informationskriterium (Strafterm), engl. **Akaike's Information Criterion**, **AIC** (AKAIKE 1973) hinzugezogen. Als Schätzverfahren diente für diese Arbeit die Maximum-Likelihood-Methode (Formel 17).

Formel 17: Likelihood-Funktion für den diskreten Fall (BEICHELT und MONTGOMERY 2003)

$$L(\theta) = p(x_1; \theta) * p(x_2; \theta) \dots p(x_n; \theta) = \prod_{i=1}^n p(x_i; \theta)$$

$\theta$ ..... zu schätzender Parameter der Verteilung von X  
 $p(x)$ ... Einzelwahrscheinlichkeiten aller x von  $\theta$

Beim AIC gehen die Anpassungsgüte des geschätzten Modells an die vorliegenden empirischen Daten (Stichprobe) und Komplexität des Modells, gemessen an der Anzahl der Parameter, in die Beurteilung ein (Formel 18). Der Nachteil des Informationskriteriums von Akaike ist, dass der Strafterm von der Stichprobengröße unabhängig ist. Bei großen Stichproben sind Verbesserungen der Log-Likelihood bzw. der Residualvarianz „leichter“ möglich, weshalb das Kriterium bei großen Stichproben tendenziell Modelle mit verhältnismäßig vielen Parametern vorteilhaft erscheinen lässt. Deshalb wurde zusätzlich das Bayes'sche Informationskriterium, engl. **B**ayesian **I**nformation **C**riterion [**BIC**] oder **S**chwarz-**B**ayes **C**riterion [**SBC**] (SCHWARZ 1978) herangezogen (Formel 19).

Formel 18: Gleichung zur Berechnung des AIC's

$$AIC = -2 * \log L + 2 * M$$

Formel 19: Gleichung zur Berechnung des BIC's

$$BIC = -2 * \log L + \log(N) * M$$

M ... Anzahl der zu schätzenden Modellparameter

L ... Summe der Loglikelihood-Funktion

N... Stichprobengröße

Je kleiner die Werte der beiden Kriterien, desto besser ist das Modell angepasst. Aber nicht nur das beste statistische Modell war von Interesse, sondern vor allem dasjenige, das für die vorliegende ökologische Fragestellung die plausibelsten Ergebnisse lieferte. Die Forschung richtet sich vor allem darauf, ob das gefundene Modell die gemessenen Ergebnisse ökologisch plausibel widerspiegelt.

Für die Berechnung mit WaldStat 7.0 wird im Hauptfenster die Eingabe des Fallenradius verlangt. Bei kreisförmigen Fallen muss mit dem exakten Fallenradius gerechnet werden. Dieser Radius beträgt für die Fallen am Lehrstuhl für Waldbau der Technischen Universi-

tät Dresden 0,2575 m. Als zweite Variante können auch die gemessenen Daten in den eingelesenen Dateien schon auf einen Quadratmeter bezogen werden. Hierbei ist zu beachten, dass ebenfalls der Radius der Fallen für 1 m<sup>2</sup> angegeben werden muss. Für 1 m<sup>2</sup> müsste also die Falle einen Radius von 0,564 m haben.

Für die erläuterten Berechnungen in WaldStat müssen zuvor die Positionen der Birken bzw. Fichten sowie der Streufallen in Form von kartesischen Koordinaten und die zugehörigen Bruthöhendurchmesser (BHD`s) in das Programm geladen werden.

#### **3.6 Streuzersetzungsexperiment**

Ziel dieses experimentellen Ansatzes war es festzustellen, inwieweit einzelbaumweise eingemischte Birken die Streuzersetzung beeinflussen und ob die Beimischung von Birkenblättern zu Fichtennadeln die Zersetzbarkeit der Fichtennadeln verbessert.

Für das Experiment wurden Litter-Bags mit den Maßen 15 cm x 15 cm hergestellt. Das dafür verwendete Polypropylengewebe (Maschenweite: 1 mm) ließ sich durch Schweißen an den Rändern verschließen. Gestanzte Kunststoffbänder gewährleisteten die Beschriftung der Proben in den Streubeuteln. Um für das Experiment geeignetes Streumaterial zu gewinnen, wurden im Herbst 2007 in einem Nachbarbestand der Untersuchungsfläche mehrere Fichten und Birken auf ausgelegte Planen gefällt. Dadurch war es möglich, Streu zu gewinnen, die noch keinen Kontakt zum Boden hatte. Grüne Fichtennadeln oder Birkenblätter fanden im Experiment keine Verwendung, sondern nur Blätter, die kurz vor dem Abfallen waren. Tab. 15 zeigt die fünf hergestellten Varianten.

Tab. 15: Auflistung der fünf Litter-Bag-Varianten (diese Tabelle dient gleichzeitig als Legende für Abb. 20)

Variante	Anteil von Birkenblättern und Fichtennadeln in den Litter-Bags zu Beginn des Versuches – Feuchtemasse [g]	Anteil von Birkenblättern und Fichtennadeln in den Litter-Bags zu Beginn des Versuches – Trockenmasse [g]
I	10 g Birkenblätter, 0 g Fichtennadeln, Filtertüte	5,7 g Birkenblätter, 0 g Fichtennadeln, Filtertüte
II	10 g Birkenblätter, 2 g Fichtennadeln, Filtertüte	5,7 g Birkenblätter, 1,9 g Fichtennadeln, Filtertüte
III	3 g Birkenblätter, 2 g Fichtennadeln, Filtertüte	2,3 g Birkenblätter, 1,9 g Fichtennadeln, Filtertüte
IV	2 g Fichtennadeln, Filtertüte	1,9 g Fichtennadeln, Filtertüte
V	0 g Birkenblätter, 0 g Fichtennadeln (Nullvariante = Litter-Bag mit Filtertüte)	0 g Birkenblätter, 0 g Fichtennadeln (Nullvariante = Litter-Bag mit Filtertüte)

Die Trockenmassen wurden mit Hilfe von Trockensubstanzfaktoren berechnet (TSF).

Formel 20: Formel zur Berechnung des Trockensubstanzfaktors

$$\text{TSF} = \text{TM}/\text{FM}$$

Dieser Faktor ist notwendig, da das auszubringende Material nicht getrocknet werden durfte, um physikalische und chemische Veränderungen zu verhindern. Das Material musste demzufolge feucht eingewogen werden. Zur Bestimmung des Trockensubstanzfaktors wurden Aliquote der frischen Blätter und Nadeln 48 h bei 60 °C getrocknet und gewogen. Die Litter-Bags konnten aufgrund der sehr zeitaufwendigen Einwaage im Labor nicht am selben Tag gefüllt werden. So entstanden für die Birkenblätter zwei etwas abweichende Trockensubstanzfaktoren (Tab. 16).

Tab. 16: Ermittelte Trockensubstanzfaktoren

Feuchtemasse [g]	Trockenmasse [g]	Trockensubstanzfaktor
10 g Birkenblätter	5,7 g Birkenblätter	1,75
3 g Birkenblätter	2,3 g Birkenblätter	1,30
2 g Fichtennadeln	1,9 g Fichtennadeln	1,05

Bei einer Maschenweite von 1 mm fiel ein großer Anteil von Fichtennadeln schon beim Füllen der Litter-Bags durch die Maschen. Deshalb war die Streu zunächst in ungebleichte und schnell kompostierbare Teefiltertüten zu füllen und erst dann in die Litter-Bags einzuschweißen. Bei den Entnahmen der Litter-Bags aus dem Bestand war darauf zu achten, dass kein Material aus den Litter-Bags verloren geht. Durch die beginnende Zerset-

zung der Streu im Bestand und die während dieser Zeit auftretenden Pilzhyphen, die die Streu „verfilzten“, bestand nicht die Gefahr, dass einzelne Nadeln bei der Entnahme aus den Litter-Bags fielen.

Die Litter-Bags wurden am 18.12.2007 an den folgenden Ausbringungsorten im Bestand verteilt:

- unter der Krone einer einzelbaumweise eingemischten Birke;
- unter dem Kronenrand einer einzelbaumweise eingemischten Birke;
- unter Fichte ohne Einmischung von Birke.

An jedem der drei Ausbringungsorte (a, b, c) erfolgten fünf Wiederholungen, also gab es jeweils fünf Blöcke.

Abb. 20 zeigt die Anordnung der Litter-Bags innerhalb eines Blocks. Alle Varianten existieren viermal, da jeweils vier Entnahmetermine geplant waren, an denen aus jedem Block von jeder Variante ein Litter-Bag entnommen werden sollte. Im Jahr 2008 fanden die Entnahmen nach 130 Tagen (25.04.2008) und nach 220 Tagen (24.07.2008) statt. Zwei Herausnahmen waren für das Jahr 2009 geplant. Da der Schneebruch den Untersuchungsbestand im Bereich der Litter-Bags jedoch im Winter 2008/2009 zerstört hatte, fand das Experiment nach 506 Tagen (07.05.2009) ein Ende. Die verbleibenden Litter-Bags wurden eingesammelt. Deshalb beschränkt sich das Experiment auf ein Jahr und vier Monate (demzufolge beinhaltete es eine Vegetationsperiode).

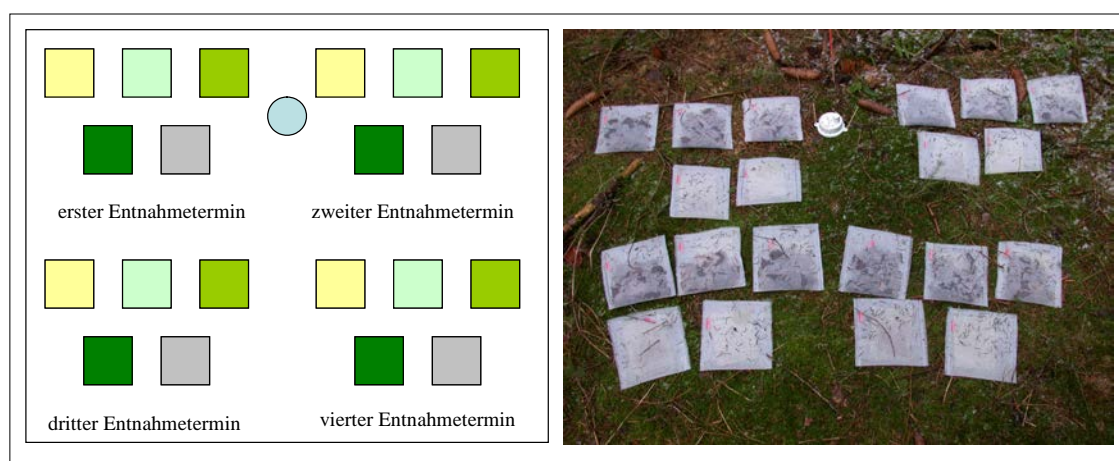


Abb. 20: Schematische Darstellung eines Litter-Bag-Blocks mit Temperaturmessgerät in der Mitte (blau eingefärbter Kreis) mit farblicher Übereinstimmung der Varianten zu Tab. 15 sowie Fotografie eines Litter-Bag-Blocks im Bestand mit Temperaturmessgerät

Bei vier Entnahmetermenen, fünf Varianten und fünf Wiederholungen an drei Ausbringungsorten ergeben sich insgesamt 300 Litter-Bags (Anlagen 5 und 6). Die Litter-Bags wurden horizontal auf der Bodenoberfläche (L-Lage) exponiert. Um zu gewährleisten, dass die Streubeutel nicht durch äußere Einflüsse (z. B. Wildtiere) verlagert werden können, mussten die Streubeutel mit Holznägeln verankert werden. Es durfte sich bei der Auswahl der Ausbringungsorte keine weitere Birke in der Nähe befinden.

Im Labor erfolgte die Bestimmung der Streutrockenmassen. Voraussetzung dafür war die vorherige Trennung und Trocknung (48 Stunden bei 60°C) der beiden Streuarten. Im Anschluss konnten die C/N-Verhältnisse als Indikator für die Veränderung der Streuqualität bestimmt werden. Grundlage für die Analysen (Methodik in Kap. 3.8) waren aus den Wiederholungen hergestellte Mischproben. Da das Experiment durch Schneebruch vorzeitig Abbruch fand, wurde auf weitere sehr aufwendige und teure chemische Analysen verzichtet.

Im Zentrum des ersten Blocks wurde an jedem der drei Ausbringungsorte in der direkten Umgebung der Litter-Bags ein miniaturisiertes Temperatur-Messgerät am Boden installiert (Abb. 21).



Abb. 21: HOBO® H8 Pro Temperatur Logger (ø 8 cm)

Das weiße Gehäuse verhindert eine starke Erwärmung des Gerätes durch die Sonnenstrahlung und ist wetterfest. Der Logger misst mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,17^\circ \text{C}$  im Bereich von  $-30^\circ \text{C}$  bis  $+50^\circ \text{C}$ .

#### **3.7 Ansprache des Humuskörpers**

Die Erhebung und Auswertung der Daten der Ansprache des Humuskörpers war durch die Betreuung einer Masterarbeit (TISCHER 2009) möglich. An jedem Probepunkt erfolgten mehrere Humusansprachen gemäß AK STO (2003). Dabei galt es, auf möglichst homogene Bodenverhältnisse zu achten, weshalb der gewählte Abstand bei Störungen (z. B. liegende Baumstämme, Stubbenflächen, Verwerfungen im Profil) zu variieren war. Es waren Zonen zu meiden, die durch angrenzende Wege oder Nutzungseingriffe (z. B. Befahren, Begehen) beeinflusst erschienen. Angesprochen wurden Mächtigkeit und morphologische Ausprägung der Humushorizonte L, Of, Oh gemäß AK STO (2003). Die Erhebungen erfolgten auf den gleichen Transekten, auf denen auch die Bodenvegetation erfasst wurde (Abb. 11 und Abb. 12 in Kap. 3.4).

In Tab. 17 ist die Anzahl der Punkte, die sich für die einzelnen Straten ergeben, zusammengefasst.

Tab. 17: Straten der Humuskörperansprache

Stratum	Punkteanzahl
Birke	38
Fichte-Birke	30
Fichte	34

#### **3.8 Chemische Analysen**

Für die bodenchemischen Analysen wurden von 40 Punkten Proben für die Horizonte Of, Oh und A (also insgesamt 120 Proben) im Jahr 2008 entnommen und analysiert. In Tab. 18 sind die verwendeten bodenchemischen Analyseverfahren aufgelistet.  $C_{\text{ges}}$  und  $N_{\text{ges}}$  sind ebenfalls für die Proben aus dem Streubeutelexperiment ermittelt worden. Da es sich dabei um geerntete Blätter und Nadeln, die sich kurz vor dem Abfallen befanden, handelte, konnte das  $C_{\text{ges}}$  gleich  $C_{\text{org}}$  gesetzt werden. So war es möglich, das C/N-Verhältnis zu bestimmen.



Tab. 18: Übersicht über die verwendeten chemischen Methoden für die Boden- und Streuproben

Parameter	Methode
<b>C<sub>ges</sub> und N<sub>ges</sub></b>	Oxidative Aufschlussmethoden bei 1150 °C Gerät „Vario El“ (Hereus) Vorbereitung der Proben: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Lufttrocknung (min. 48h bei 60°C)</li> <li>- Feinmahlung Humusproben bei 700 U/min (Planetenmühle/Achatbecher) gem. BMELV (2009)</li> <li>- Feinmahlung Mineralproben bei 1400 U/min (Planetenmühle/Achatbecher) gem. BMELV (2009)</li> </ul>
<b>C<sub>carbonat</sub></b>	Gas-volumetrische Bestimmung nach Scheibler (DIN ISO 10693, HFA 3.5.6a, gemäß BMELV 2009)
<b>C<sub>org</sub></b>	Berechnung der Differenz aus C <sub>ges</sub> - C <sub>carbonat</sub>
<b>C<sub>mic</sub> und N<sub>mic</sub></b>	Chloroform-Fumigation-Extraktion (nach VANCE et al. 1987 und JOERGENSEN 1995)
<b>Basalatmung</b>	Basalatmung nach ISEMEYER (1952) modifiziert nach JÄGGI (1976)
<b>Acidität</b>	10mg luftgetrocknete Humusaufgabe bzw. 10mg Mineralboden werden mit demineralisiertem H <sub>2</sub> O bzw. mit 0,01 M CaCl <sub>2</sub> oder mit 1 M KCl-Lösung (je 50 ml) suspendiert und die pH-Werte potentiometrisch mittels Glaselektrode und einem daran angeschlossenen pH-Meter (Multilab 540 WTW) bestimmt (gemäß BMELV 2009, A3.1.1.2 in Anlehnung an DIN ISO 10390)
<b>KW-extrahierbare Gehalte</b>	für Of- und Oh-Lage, A-Horizont sowie Streu Königswasseraufschluss (gemäß BMELV 2009, A3.3.3 in Anlehnung an DIN ISO 11466): mit einer Säuremischung aus 5 ml HNO <sub>3</sub> und 15 ml HCl in Quarzaufschlußgefäßen mit Thermostatheizblock SMA12 HT (Fa. BEHR). Die Analyse von Ca, Mg, K, Na, Mn, Fe, Al, S, P, Ba, Cu, Sr, Ti und Zn wird am ICP-AES vollzogen. Zur Analyse dient ein Vista Pro Axial ICP-OES-Gerät. Vorbereitung der Proben: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Lufttrocknung (min. 48h bei 60°C)</li> <li>- Feinmahlung Humusproben bei 700 U/min (Planetenmühle/Achatbecher) gem. BMELV (2009)</li> <li>- Feinmahlung Mineralproben bei 1400 U/min (Planetenmühle/Achatbecher) gem. BMELV (2009)</li> <li>- Trocknung vor der Einwaage bei 105°C</li> </ul>
<b>Gesamtgehalte</b>	für Proben des Mineralbodens der Profilbeschreibung und des Gesteins Totalaufschluss (gemäß BMELV 2009, A3.3.5 in Anlehnung an DIN ISO 14869)
<b>AK<sub>eff</sub></b>	BaCl <sub>2</sub> -Extraktion (in Anlehnung an DIN ISO 11260, gemäß BMELV (2009) HFA A3.2.1.3)

Viele Analysen erfolgten im sächsischen Referat „Bodenmonitoring/ Standorterkundung/ Labor“ des Kompetenzzentrums Wald und Forstwirtschaft in Anlehnung an das „Handbuch Forstliche Analytik“ (BMELV 2009), um die Vergleichbarkeit der Messwerte mit den im regulären Bodenmonitoring erhobenen Daten zu gewährleisten. Dieses Handbuch hat laut BMELV (2009) u. a. das Ziel, die Analysequalität der BZE II-Daten in Deutschland aber auch für das gesamte forstliche Umweltmonitoring zu verbessern. Desweiteren dient es als Beitrag für die EU-weite Bodenzustandserhebung im Rahmen des EU-Programms "Bio-Soil". Zum Königswasseraufschluss sollte in diesem Zusammenhang ergänzend zu der Tab. 18 erwähnt werden, dass dieses Verfahren nach der Arbeitsanleitung für die

bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BMELF 1994) für Humusproben vorzugsweise angewendet wird. Dem BMELV (2009) zufolge ergaben Untersuchungen im Rahmen von Ringanalysen des Gutachterausschusses Forstliche Analytik, dass mit dem Königswasser-Extrakt im Vergleich zum Totalaufschluss bei Humusproben außer Na, K, Mg und Al alle weiteren Nährelemente und die meisten Schwermetalle nahezu zu 100 % erfasst werden (KÖNIG und WOLFF 1993).

Für die Berechnung der Vorräte wurden Bodenproben mit Stechzylindern ausgestochen und anschließend bei 105 °C 24 Stunden getrocknet. Danach mussten die Proben aus den Zylindern herausgehoben und die Mächtigkeit gemessen werden. Die endgültige Horizontmächtigkeit ergab sich aus den drei pro Horizont erhobenen und gemittelten Mächtigkeiten. Die einzelnen Horizonte konnten anschließend gesondert herauspräpariert und gewogen werden. Daraufhin wurde der Skelettanteil mit einem 2 mm-Sieb entfernt und dessen Masseanteil in der Horizontfläche  $[g/m^2]$  bestimmt. Mit Hilfe des gegebenen Stechzylinderdurchmessers und die ermittelte Horizontmächtigkeit ließ sich das Horizontvolumen  $[cm^3/m^2]$  berechnen. Die Trockenraumdichte (TRD)  $[g/cm^3]$  der Horizonte ließ sich gem. AK STO (2003) durch Division der Horizontmasse mit dem Horizontvolumen errechnen.

Die Lage der Probepunkte ist in Abb. 22 markiert. Abb. 23 zeigt nur die Tansekte, die für die Messung der biologischen Aktivität dienten.

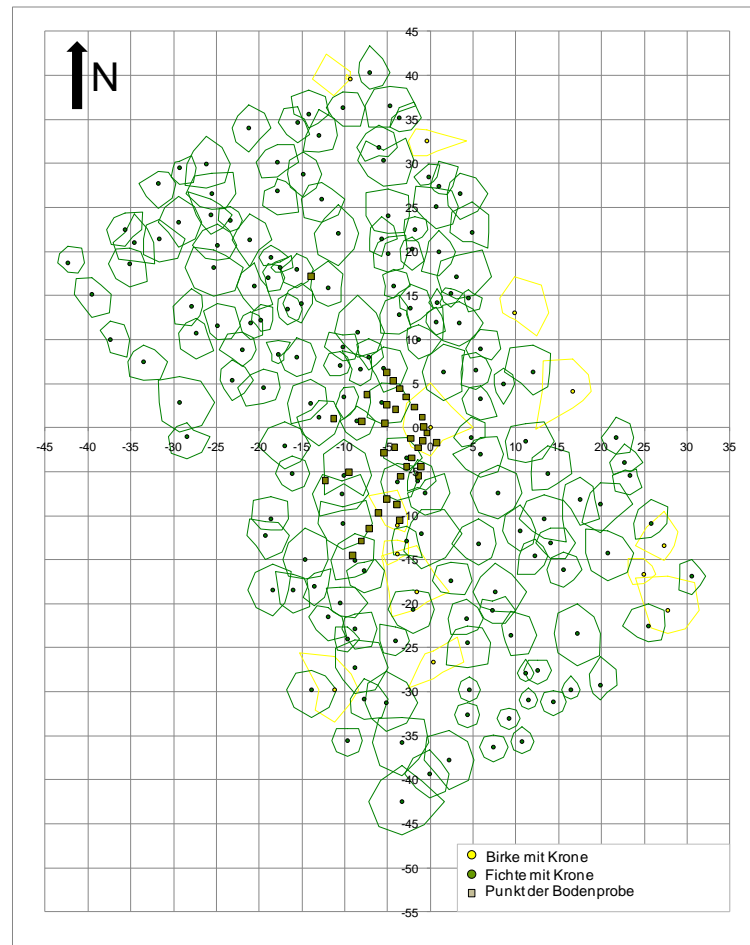


Abb. 22: Stamm- und Bodenprobenverteilungsplan bei einzelbaumweiser Einmischung von Birke in Fichte (nicht maßstabsgetreu)

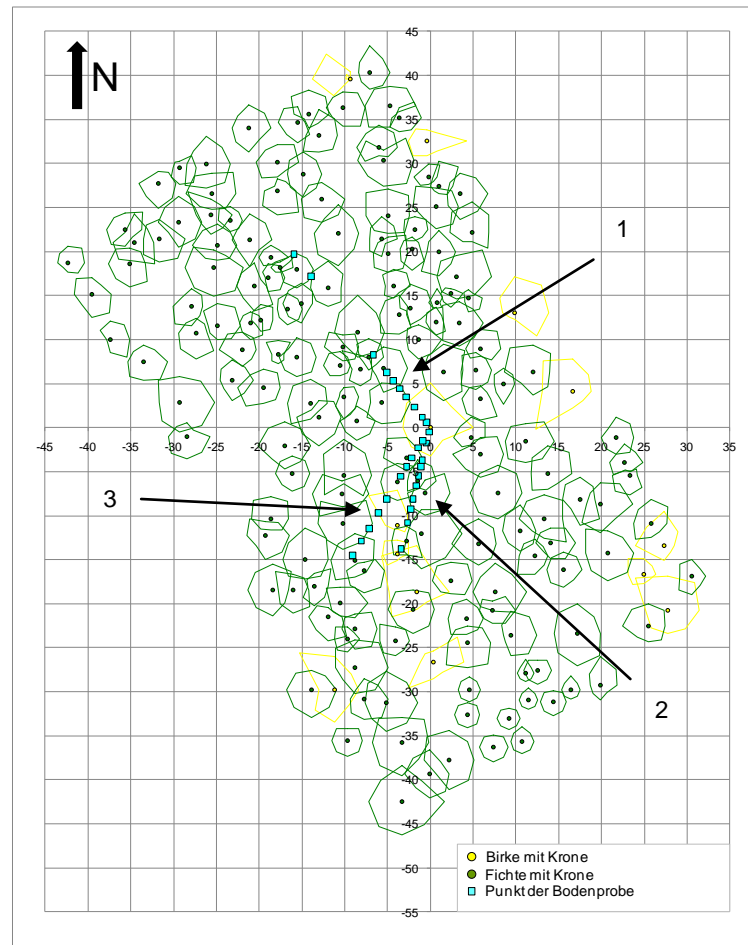


Abb. 23: Stamm- und Probepunkteverteilungsplan für die biologische Aktivität (Basalatmung,  $C_{mic}$  und  $N_{mic}$ ) mit den Transektnummern 1 bis 3 (nicht maßstabsgetreu)

Die Messungen und Auswertungen zur mikrobiellen Aktivität sind durch die Betreuung einer Diplomarbeit (SCHÖBER 2009) abgedeckt worden.

## 4. Experimentelle und mathematisch-statistische Auswertung

### 4.1 Strahlung

Im Bestand wurden in den unterschiedlichen Mischungsbereichen Strahlungsmessungen durchgeführt, die mit Hilfe spezieller Software ausgewertet werden konnten (vgl. Kap. 3.3). Durch das Strahlungsmodell „tRAYci“ ist es möglich, das Strahlungsangebot unter Baumkronen zweidimensional bzw. dreidimensional zu simulieren und Strahlungskarten für die Untersuchungsflächen zu erstellen. In Anlage 9 sind die Ergebnisse der Strahlungsmessungen detailliert aufgelistet. Der Freiflächenwert betrug dabei rund 104 Watt/m<sup>2</sup> (siehe dazu Kap. 3.3). Abb. 24a und b sowie Abb. 25a und b zeigen die mit „tRAYci“ modellierten PACL-Werte für beide Flächen. PACL, was PARRF entspricht, spiegelt den relativen Lichtgenuss im Vergleich zur Freilandhelligkeit wider. Zur Trennung der modellierten Werte von den aus den hemisphärischen Fotos hergeleiteten Größen wird in dieser Arbeit die Abkürzung PACL für die mit tRAYci modellierten Werte genutzt und PARSF bzw. par % für die aus den Fisheye-Fotos hergeleiteten Größen. Abb. 24a und b repräsentieren dabei die Fichten-Birken-Fläche, Abb. 25a und b hingegen die reine Fichtenfläche.

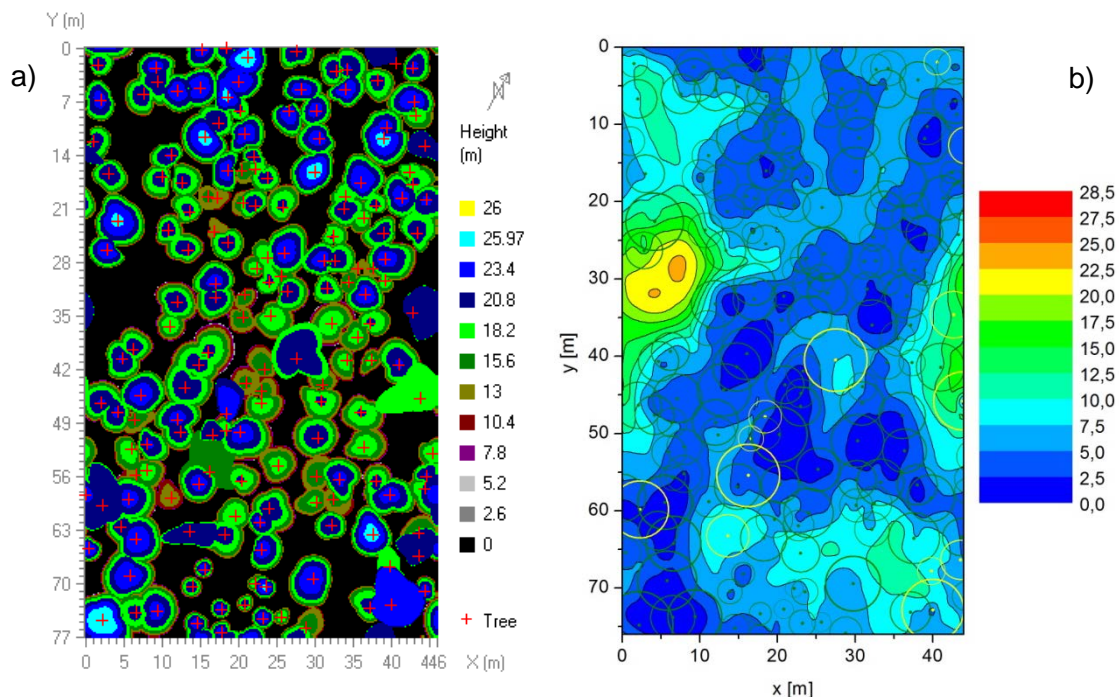


Abb. 24: a) Baumhöhen der Fichten-Birken-Fläche sowie b) Strahlung der Fichten-Birken-Fläche (die gelben Kreise markieren die Birken)

Aus Abb. 24b ist deutlich zu erkennen, dass im Bereich der Birkenkronen überwiegend höhere Strahlungswerte zu finden sind als unter den Fichtenkronen. Diese Erhöhung kann aber auch in den Bereichen des Bestandes festgestellt werden, in denen die Fichten kleiner und dünner sind und in den Partien des Bestandes, die nicht so dicht sind. In sehr lichten bzw. lückigen Bereichen treten noch höhere Werte auf als unter den Birkenkronen. Insgesamt macht der Bestand, bezogen auf die Strahlung, einen sehr heterogenen Eindruck.

Vergleicht man nun diesen Fichten-Birken-Bestand (Abb. 24b) mit der reinen Fichtenfläche (Abb. 25b) wird abermals klar, dass sich die höheren Strahlungswerte, die unter den Birkenkronen zu finden sind, auch in lichterem bzw. lückigeren Partien des reinen Fichtenbestandes zeigen.

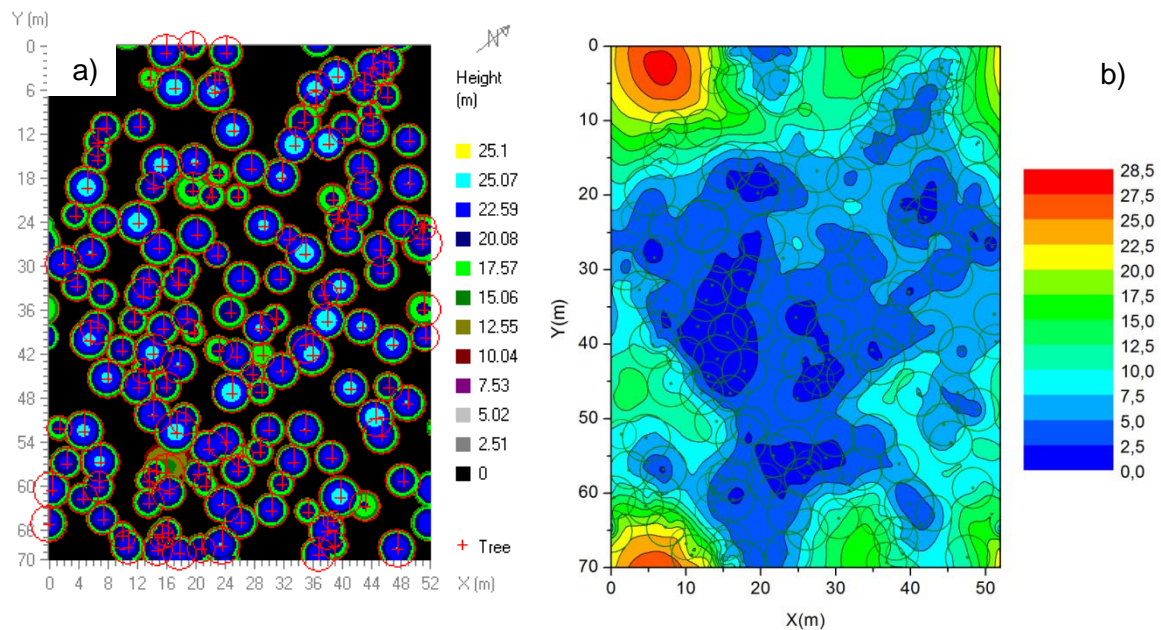


Abb. 25: a) Baumhöhen der Fichten-Fläche sowie b) Strahlung der Fichten-Fläche

Aus diesem Kapitel sollte insbesondere für die spätere Interpretation von Unterschieden bei den bodenkundlichen und vegetationskundlichen Daten festgehalten werden, dass eine Mannigfaltigkeit im Strahlungshaushalt durch die Birken, vor allem aber auch durch die Heterogenität der Bestandesdichte gegeben ist. So ist sowohl in den Fichten-Birken-Bereichen als auch in reinen Fichtenpartien eine Heterogenität sekundärer Variablen (wie der Bodenvegetation) und letztendlich der Oberbodeneigenschaften allein schon durch das unterschiedliche Strahlungsangebot zu erwarten.

Die verwendeten Eingangsgrößen für das Programm „tRAYci“ zur Berechnung der Strahlungskarten sind in den Anlagen 7 und 8 aufgeführt.

##### **Modellkalibrierung**

Für die Kalibrierung des Modells „tRAYci“ dienten die berechneten par %-Werte (= PARSF) aus Anlage 9. Korrelation, Bestimmtheitsmaß und Variationskoeffizient dienten neben der Prüfung der ökologischen Plausibilität der Validierung des Modells. Dabei wurden zum einen alle Punkte einbezogen und zum anderen kritische Punkte entfernt (Abb. 26) für die Fichten-Birken-Fläche und Abb. 27 für die reine Fichten-Fläche). Kritische Punkte sind solche, die zu stark am Rande des Stammverteilungsplanes bzw. direkt unter der Krone in Stammnähe lagen und so zu starken Abweichungen zwischen Modell und Messung führten. Bei der Auswertung der Ergebnisse zeigte sich deutlich, dass „tRAYci“ die Werte direkt in Stammnähe nicht repräsentativ wiedergeben kann. Die Strahlungskarten 25b und 26b sollen also vor allem einen Gesamteindruck der photosynthetisch aktiven Strahlung, die durch das Kronendach gelangt und über der Bodenvegetation messbar ist, vermitteln und Vergleiche zwischen der Fichten-Birkenfläche und der reinen Fichten-Fläche ermöglichen.

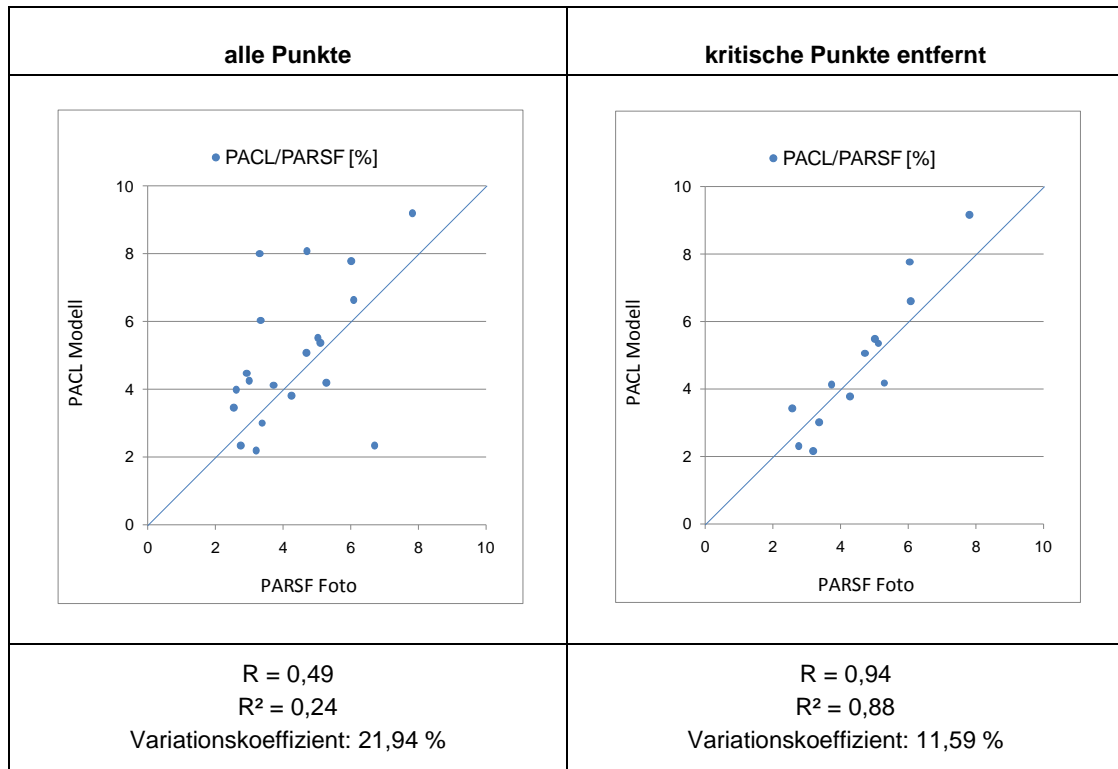


Abb. 26: Korrelation, Bestimmtheitsmaß und Variationskoeffizient von PACL/PARSF in Prozent für die Fichten-Birken-Fläche

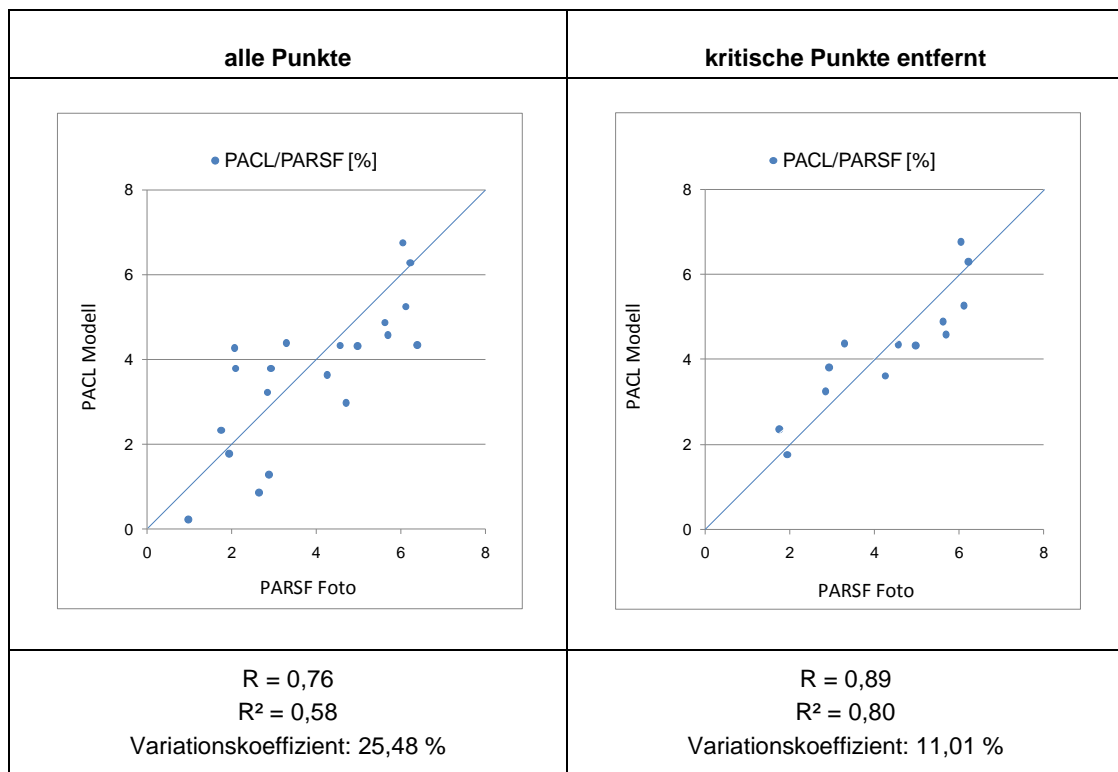


Abb. 27: Korrelation, Bestimmtheitsmaß und Variationskoeffizient von PACL/PARSF in Prozent für die Fichten-Fläche



**Fazit:**

*Deutlich zeigt sich, dass im Bereich der Birkenkronen überwiegend höhere Strahlungswerte zu finden sind als unter den Fichtenkronen. Diese Erhöhung kann aber auch in den Bereichen des Bestandes festgestellt werden, in denen die Fichten kleiner und dünner waren und in den Partien des Bestandes, die nicht so dicht waren. In sehr lichten bzw. lückigen Bereichen treten noch höhere Werte auf als unter den Birkenkronen. Beim Vergleich des Fichten-Birken-Bestandes mit der reinen Fichtenfläche wird nochmals sichtbar, dass sich die höheren Strahlungswerte, die unter den Birkenkronen auftreten, auch in lichterem bzw. lückigeren Partien des reinen Fichtenbestandes finden. Durch diese Vielfalt des Strahlungsangebots ist auch eine Heterogenität sekundärer Variablen (wie der Bodenvegetation) und letztendlich der Oberbodeneigenschaften zu erwarten.*

## **4.2 Bodenvegetation**

Gemäß Kap. 3.4 wurde die Bodenvegetation entlang von Transekten in einer Fichten-Birken-Fläche und einer reinen Fichtenfläche kartiert. In Anlehnung an das Methodenkapitel 3.2 wird das Ergebniskapitel der Bodenvegetation in drei Unterkapitel gegliedert. Im Kap. 4.2.1 werden die Sippenanzahlen, die Deckungsgrade und Stetigkeiten nach Transekten dargestellt. Darauf folgt eine Darstellung nach Straten (Kap. 4.2.2). Dabei sind die folgende Punkte aufgeführt: Sippenanzahlen, Deckungsgrade und floristische Ähnlichkeiten (u. a. mit Hilfe der Zeigerwerte nach ELLENBERG et al. 2001). Kap. 4.2.3 fasst die Ergebnisse der Sippenanzahl, der auftretenden Sippen sowie der Deckungsgrade für die ganze Untersuchungsfläche zusammen.

### **4.2.1 Vergleich der Sippenanzahlen, Deckungsgrade und Stetigkeiten nach Transekten**

#### **Sippenanzahl und Deckungsgrad**

Bei der Verteilung der Sippenanzahl für die Kraut- und Moossicht entlang eines Transektes in der Fichten-Birken-Partie sind deutlich höheren Anzahlen unter der großen Zentralbirke ersichtlich (Abb. 28). Unter der kleineren Birke, die mehr Konkurrenzdruck hat (allerdings konkurrenzfrei aus Richtung Westen), ist diese Tendenz nicht zu beobachten.

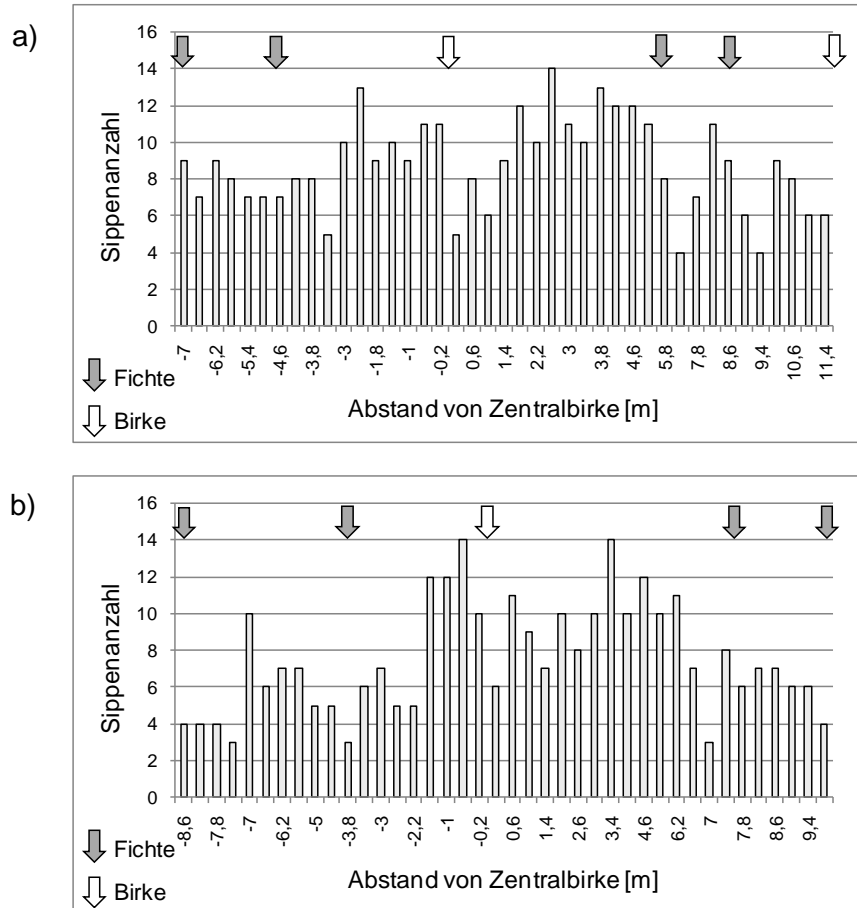


Abb. 28: a) Sippenanzahl der Kraut- und Moosschicht des Transektes Fichte-Birke 1 (positive Distanzen = Nordwest = Transekt 102; negative Distanzen = Südost = Transekt 104) sowie b) Sippenanzahl der Kraut- und Moosschicht des Transektes Fichte-Birke 2 (positive Distanzen = Nordwest = Transekt 103; negative Distanzen = Südost = Transekt 105)

Auch die zweite Abbildung (Abb. 28b) verdeutlicht, dass die Gesamtsippenanzahl unter der Birkenkrone höher ist als unter den Fichtenkronen.

Sieht man sich nun die Gesamtsippenanzahlen des reinen Fichtenteils (Abb. 29) an, sind auch hier z. T. 14 Sippen zu finden.

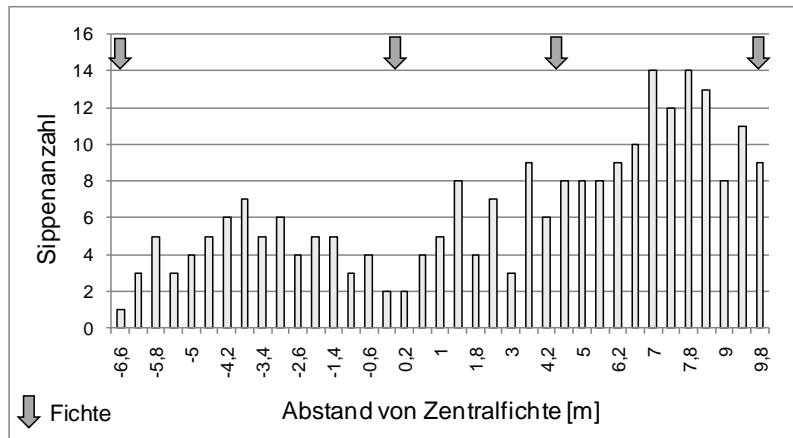


Abb. 29: Sippenanzahl der Kraut- und Moosschicht Transekt Fichte (positive Distanzen = West = Transekt 202; negative Distanzen = Südost = Transekt 204)

In den Abb. 28a und Abb. 29 ist sehr gut zu erkennen, dass eine Erhöhung der Sippenanzahl sowohl unter reiner Fichte als auch in Mischung von Fichte mit Birke vor allem mit zunehmender Annäherung zum Kronenrand stattfindet. In Stammnähe finden sich meist nur geringe Sippenanzahlen. Dieser Trend ist auch wiederzufinden, wenn die Kraut- und Moosschicht getrennt betrachtet werden und dabei vor allem in der Krautschicht (ohne Abbildung).

Abb. 31 und Abb. 32 veranschaulichen die Deckungsgrade der vorkommenden Sippen in der Kraut- und Moosschicht entlang des Fichten-Birken-Transektes 1 (Abb. 31) sowie entlang des Fichten-Transektes 1 (Abb. 32). Die Transformation der Artmächtigkeiten erfolgte gemäß Abb. 30a. Die daraus resultierenden Mächtigkeiten wurden als weiße bzw. hellbraune Felder dargestellt (Abb. 30a). Ist weder ein weißes oder oranges Feld in den Abb. 31 und Abb. 32 eingezeichnet, bedeutet es, dass keine Art an diesem Punkt vorkam. Die oberste Zeile der Grafiken zeigt jeweils die Distanz zum Zentralbaum in Metern. Die Farben verdeutlichen die Positionen der Bäume (gelber Bereich = Birkenkrone, grüner Bereich = Fichtenkrone). Die Deckungsgrade wurden gemäß Abb. 30b dargestellt. Auch hier gilt: Ist weder ein braunes noch ein schwarzes Feld in den Abb. 31 und Abb. 32 dargestellt, beträgt der Deckungsgrad 0.

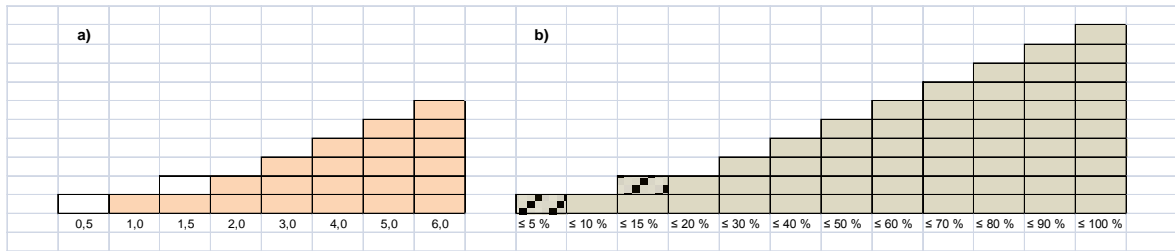


Abb. 30: Legende a) für die Artmächtigkeitsdarstellung und Sippenanzahl in Abb. 31 und 32 sowie b) der Deckungsgrade der Kraut- und Moosschicht in Abb. 31 und 32, in Anlehnung an TISCHER (2009)

Allgemein ist zu bemerken, dass die Artmächtigkeiten auf dem Fichten-Birken-Transekt (Abb. 31) im Allgemeinen höher sind als auf dem Fichten-Transekt (Abb. 32). Deutlich zu erkennen ist, dass beispielsweise *Calamagrostis villosa* an jedem Probepunkt auf dem Fichten-Birken-Transekt zu finden ist und mit sehr hohen Artmächtigkeitswerten auftritt (Abb. 31). Diese Tendenz ist für das Fichten-Transekt (Abb. 32) nicht nachweisbar. Hier tritt diese Art viel geringmächtiger auf. Die zwei Sippen *Dryopteris dilatata* (HOFFM.) GRAY und *Digitalis purpurea* fehlen auf dem Fichtentranspekt. Dafür treten die Sippen *Dryopteris carthusiana* (VILL.) H. P. FUCHS, *Epilobium angustifolium* L., *Moehringia trinervia* (L.) CLAIRV., *Brachythecium velutinum* (HEDW.), *Eurhynchium praelongum* (HEDW.), *Mnium hornum* (HEDW.) auf, die auf dem Fichten-Birken-Transekt nicht zu finden sind. Mit Sicht auf die Deckungsgrade in den Abb. 31 und Abb. 32 ist festzustellen, dass sich höhere Deckungsgrade sowohl für die Kraut- als auch für die Moosschicht auf dem Fichten-Birken-Transekt zeigen. Dabei ist die Variation in der Moosschicht auf dem Fichten-Birken-Transekt am größten. Drei Moosarten kamen nur einmal auf dem Fichten-Birken-Transekt vor. Sie sind nicht in Abb. 31 dargestellt.

Mit Blick auf die Deckungsgrade sind auf dem Transekt in der Mischungssituation stärkere Schwankungen in der Moosschicht als in der Krautschicht zu beobachten (Abb. 31). Beim Vergleich mit der reinen Fichtenfläche (Abb. 32) fallen für beide Schichten höhere Deckungsgrade der Mischung ins Auge.

#### 4. Experimentelle und mathematisch-statistische Auswertung

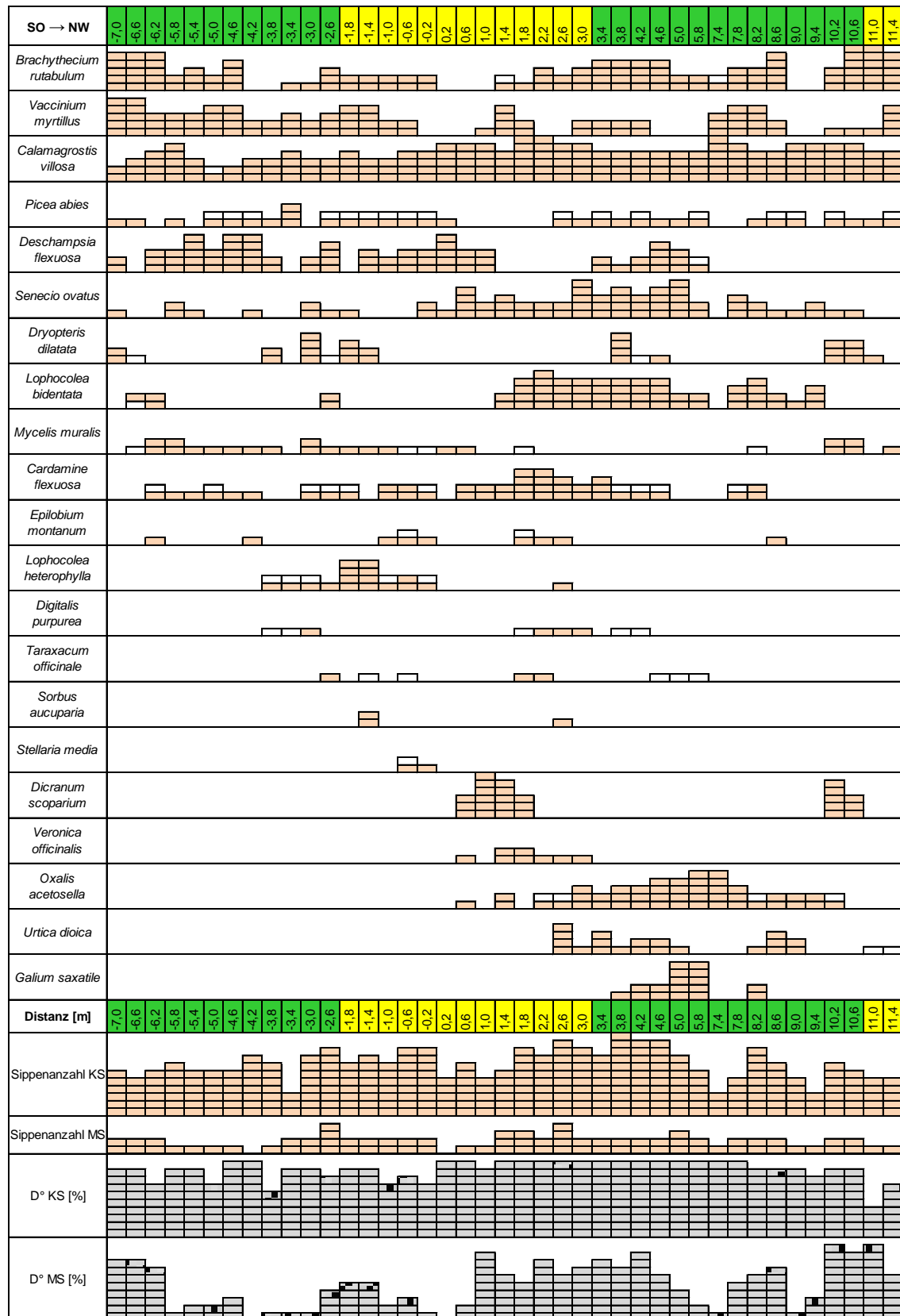


Abb. 31: Vegetationskarte Transekt Fichte-Birke 1, Artmächtigkeit sowie Sippenanzahl und Deckungsgrade (positive Distanzen = Nordwest; negative Distanzen = Südost), in Anlehnung an TISCHER (2009)

#### 4. Experimentelle und mathematisch-statistische Auswertung

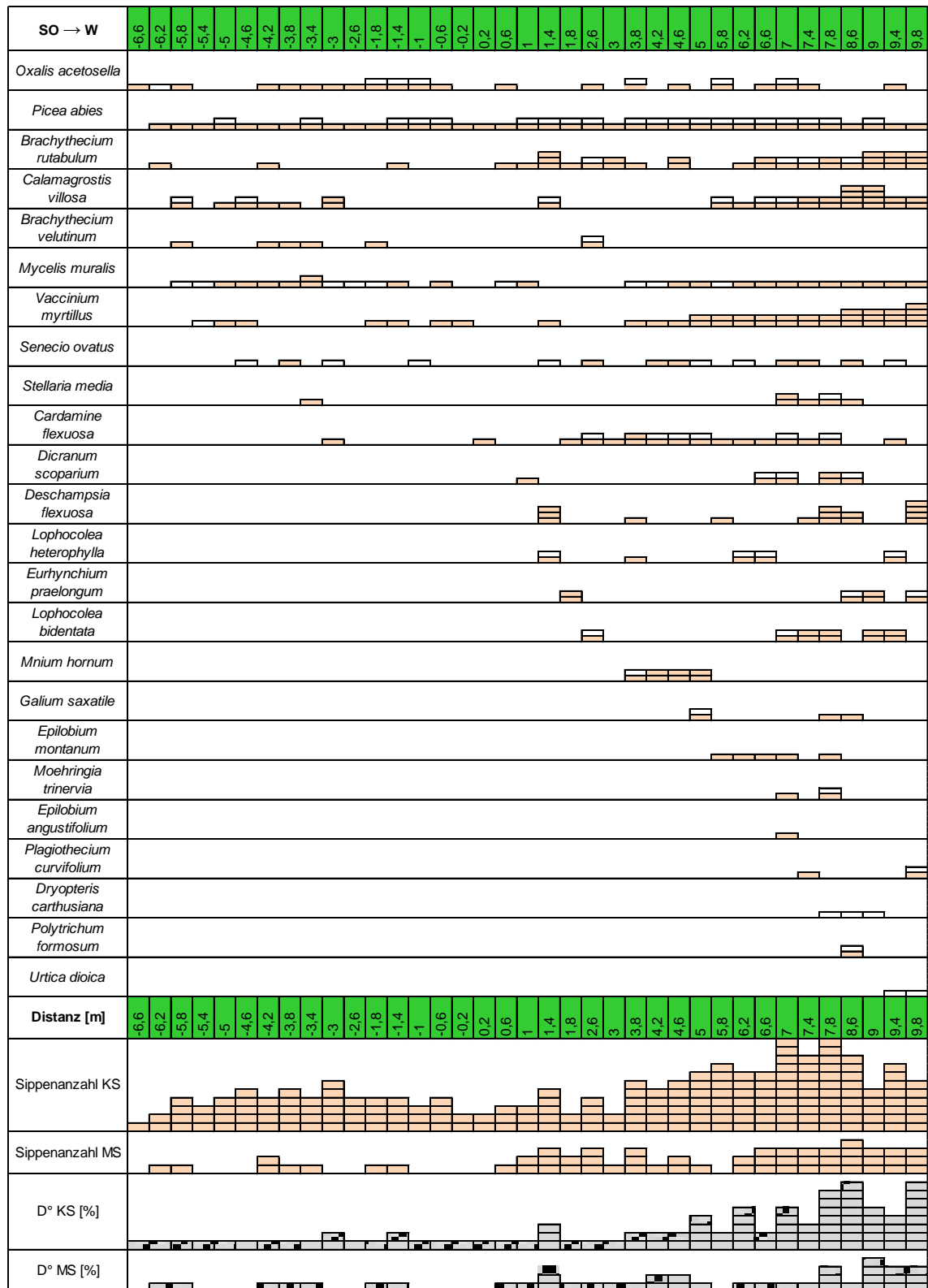


Abb. 32: Vegetationskarte Transekt Fichte, Artmächtigkeit sowie Sippenanzahl und Deckungsgrade (positive Distanzen = West; negative Distanzen = Südost), in Anlehnung an TISCHER (2009)

**Stetigkeit**

Auf dem Fichten-Transekt treten die Keimlinge von *Picea abies* sowie die Art *Mycelis muralis* mit einer hohen Stetigkeit auf (Tab. 19). *Vaccinium myrtillus* zeigt unter reiner Fichte eine von Nordost nach Südwest steigende Tendenz der Mächtigkeit der Sippen. Viele Sippen sind nur im südwestlichen Teil (rechter Teil der Abb. 32) des Transektes zu finden. Dazu gehören viele Moosarten, wie die beiden Laubmoose *Dicranum scoparium*, *Eurhynchium praelongum* sowie die beiden Lebermoosarten *Lophocolea bidentata* und *Lophocolea heterophylla*. Auch einige krautige Pflanzen verdeutlichen diese Tendenz: beispielsweise *Epilobium montanum*, *Galium saxatile*, *Moehringia trinervia* sowie *Stellaria media* und *Urtica dioica*.

Tab. 19: Stetigkeit für das Fichten-Birken-Transekt und das Fichten-Transekt nach Tab. 11

Sippe	Stetigkeit Birken-Fichten-Transekt							Stetigkeit Fichten-Transekt						
	r	+	I	II	III	IV	V	r	+	I	II	III	IV	V
<i>Calamagrostis vilosa</i>														
<i>Cardamine flexuosa</i>														
<i>Deschampsia flexuosa</i>														
<i>Digitalis purpurea</i>														
<i>Dryopteris carthusiana</i>														
<i>Dryopteris dilatata</i>														
<i>Epilobium angustifolium</i>														
<i>Epilobium montanum</i>														
<i>Galium saxatile</i>														
<i>Moehringia trinervia</i>														
<i>Mycelis muralis</i>														
<i>Oxalis acetosella</i>														
<i>Picea abies</i>														
<i>Senecio ovatus</i>														
<i>Sorbus acuparia</i>														
<i>Stellaria media</i>														
<i>Urtica dioica</i>														
<i>Vaccinium myrtillus</i>														
<i>Brachythecium rutabulum</i>														
<i>Brachythecium velutinum</i>														
<i>Dicranum scoparium</i>														
<i>Eurhynchium praelongum</i>														
<i>Lophocolea bidentata</i>														
<i>Lophocolea heterophylla</i>														
<i>Mnium hornum</i>														
<i>Plagiothecium curvifolium</i>														
<i>Polytrichum formosum</i>														

Festzuhalten ist, dass nur wenige Sippen mit einer hohen Stetigkeit auf den Transekten vorkommen (Tab. 19). Das bedeutet, dass die meisten Sippen eine räumliche Variabilität im Auftreten zeigen, also nur in bestimmten Bereichen des Bestandes vorkommen. Demzufolge reagieren sie empfindlicher auf sich ändernde Bedingungen (z. B. Lichtangebot,



Temperatur, Feuchtigkeit usw.) bzw. sind konkurrenzschwächer als die mit sehr hoher Stetigkeit auftretenden Sippen.

### **4.2.2 Vergleich der Sippenanzahlen, Deckungsgrade sowie qualitativer Aspekte nach Straten**

Wie am Anfang des Kap. 4.2 erwähnt, folgt nun die Darstellung der Bodenvegetationsergebnisse nach Straten. Als Erstes werden die Sippenanzahlen für die gesamte Bodenvegetation, also Kraut- und Moosschicht zusammen, und danach auch getrennt nach beiden Schichten dargestellt. Es folgen unterschiedliche Auswertungen, die die Bodenvegetation qualitativ beschreiben: PCA (absolut und standardisiert), eine Auswertung des Waldartenspektrums sowie der Zeigerwerte nach ELLENBERG et al. (2001). Die Anwendung der Mittelwertbildung für die folgenden ordinal skalierten Variablen wird in Kap. 3.2 kritisch diskutiert.

#### **Sippenanzahl**

Die Abb. 33 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Sippenanzahl in den drei Straten. Diese unterscheiden sich dabei deutlich. Dabei zeigen sich in allen drei Straten sowohl geringe als auch hohe Sippenanzahlen. Hinsichtlich der Heterogenität ist die folgende Reihenfolge zu beobachten: Birke < Fichte-Birke < Fichte. Für die Höhe der Sippenanzahlen kann für die Häufigkeitsverteilung festgehalten werden: Birke > Fichte-Birke > Fichte.

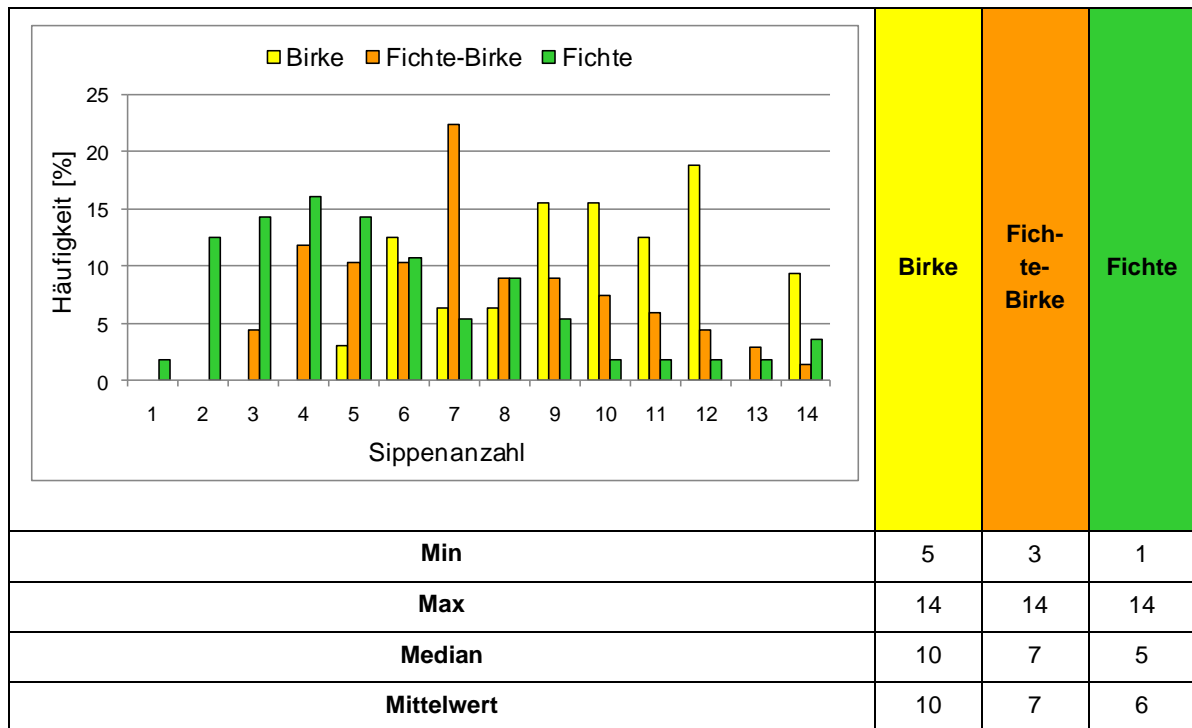


Abb. 33: Häufigkeit der Sippenanzahl für die Kraut- und Moosschicht in den drei Straten

Tab. 20 gibt eine Zusammenfassung über die einzeln betrachteten Kraut- und Moosschicht. Die Auswertung der Minima dokumentiert folgende Reihenfolge: Birke > Fichte-Birke > Fichte. Im Maximum unterscheiden sich die drei Straten nicht. Beim Median zeigt sich der nachstehende Trend: Birke > Fichte-Birke > Fichte. Die Moosschicht weist nicht so deutliche Differenzierungen auf.

Tab. 20: Kennwerte zur Verteilung der Sippenanzahl nach Straten für die Kraut- (KS) und Moosschicht (MS)

Sippenanzahl	Birke	Fichte-Birke	Fichte
Min (KS)	4	2	1
Max (KS)	11	11	11
Median (KS)	7,5	5	4
Min (MS)	0	0	0
Max (MS)	4	5	4
Median (MS)	2	2	1

So unterscheidet sich das Fichten-Stratum hinsichtlich der Anzahl der Pflanzensippen der Bodenvegetation von den Straten Birke und Fichte-Birke. Zwischen diesen beiden sind die Unterschiede geringer. In der Tendenz lässt sich zwischen den Straten folgende Reihenfolge der steigenden Sippenanzahl beobachten:  $F_i < F_{iB} < B_i$ .

### Multivariate Ordination

Die Anordnung der Aufnahme­flächen nach ihrer floristischen Ähnlichkeit in der Kraut­schicht gelang in Form eines PCA-Ordinations­diagrammes (Abb. 34). Die mittleren quanti­tativen Zeigerwerte wurden als sogenannte *supplementary environmental variables* über das Ordinations­diagramm gelegt und dienen der Interpretation der ökologischen Bedin­gungen bzw. der Achsen. Sie sind nicht in den Rechenprozess integriert, da sie keine unabhängigen Umweltparameter darstellen. Zusätzlich zu dem in Abb. 34b dargestellten Ordinations­diagramm der 1. und 2. Achse der standardisierten Werte stellt Abb. 35 die 1. und 3. Achse dar.

Die Abb. 34 enthält die verkürzten Sippennamen. Eine genaue Auflistung der zugehörigen vollständigen Sippenbezeichnungen befindet sich in Anlage 10.

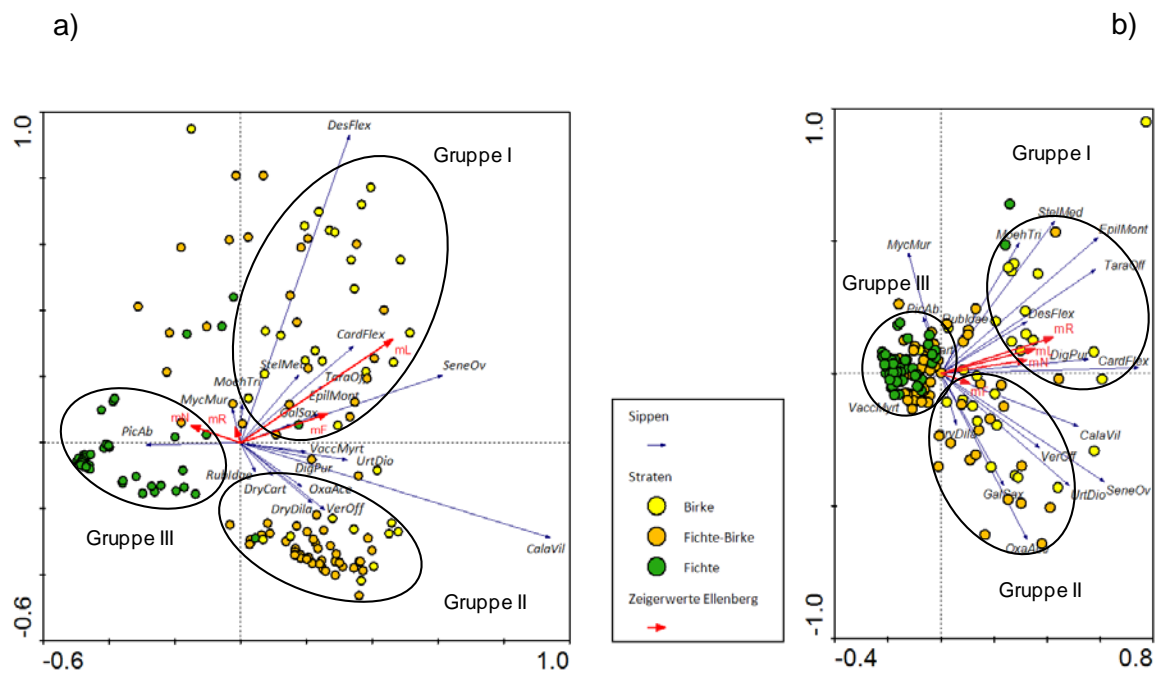


Abb. 34: PCA-Ordinationsdiagramme der Artmächtigkeit für die Krautschicht mit Sippen, Aufnahme­punkten und mittleren Zeigerwerten (mL = mittlere Lichtzahl, mF = mittlere Feuchtezahl, mR = mittlere Reaktionszahl und mN = mittlere Nährstoffzahl), Berechnung für die Achsen 1 und 2  
a) mit absoluten Werten in Anlehnung an TISCHER (2009) und b) mit standardisierten Werten

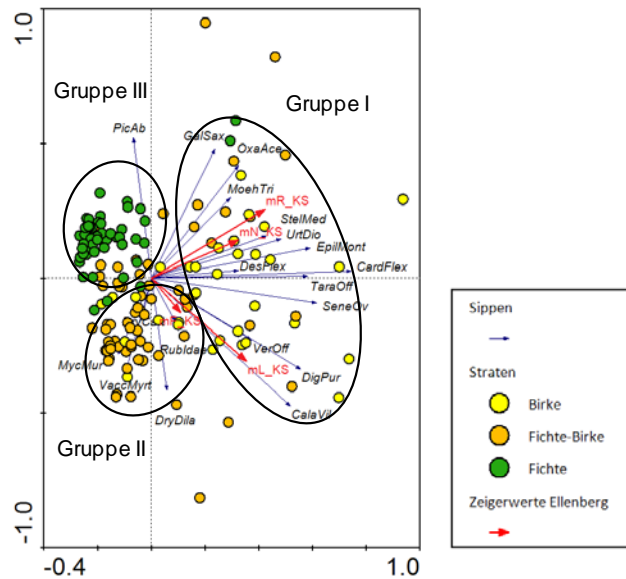


Abb. 35: PCA-Ordinationsdiagramme der Artmächtigkeit für die Krautschicht mit Sippen, Aufnahmeplätzen und mittleren Zeigerwerten (mL = mittlere Lichtzahl, mF = mittlere Feuchtezahl, mR = mittlere Reaktionszahl und mN = mittlere Nährstoffzahl), Berechnung für die Achsen 1 und 3 mit standardisierten Werten

In Tab. 21 sind die Kennwerte der Ordinationsdiagramme aus Abb. 34 und Abb. 35 angegeben. Danach erklären die beiden ersten Achsen zusammen 54 % der Varianz der absoluten Sippenzusammensetzung in der Krautschicht. Bei den standardisierten Werten sind es 29 %.

Tab. 21: Daten für das PCA-Ordinationsdiagramm für die Krautschicht der drei Straten

	absolut (Abb. 34a)				standardisiert (Abb. 34b und Abb. 35)			
Achsen	1	2	3	4	1	2	3	4
kumulative prozentuale Varianz der Daten	32,3	54,0	67,5	76,5	16,6	29,2	37,8	45,6

Wie aus den PCA-Ordinationsdiagrammen der Abb. 34 zu ersehen ist, unterscheiden sich die Baumartenstraten hinsichtlich ihrer floristischen Ausprägung. Deutlich sind die Ungleichheiten zwischen den Straten Birke und Fichte. Das Stratum Fichte-Birke nimmt dabei eine Zwischenstellung ein. Die Darstellung der ersten und dritten Achse (Abb. 35) lässt auch eine deutliche Abtrennung des Fichten-Birken-Stratums erkennen. Nach der Verteilung der Aufnahmeflächen im Raum konnten drei Gruppen bestimmt werden, die in den Abb. 34 und Abb. 35 umrandet und in Tab. 22 näher charakterisiert sind:

Tab. 22: Kennzeichen der drei ermittelten Gruppen des PCA-Ordinationsdiagrammes (Abb. 34a)

Gruppe	Merkmale
I	<ul style="list-style-type: none"> <li>- besteht überwiegend aus Aufnahmeflächen des Birken-Stratums</li> <li>- z. T. sind Aufnahmeflächen des Fichten-Birken-Stratums und wenige des Fichten-Stratums enthalten</li> <li>- Gruppe hat große Streuung</li> <li>- Kennzeichnende Sippen: <i>Deschampsia flexuosa</i>, <i>Cardamine flexuosa</i> und <i>Epilobium montanum</i></li> <li>- günstige Lichtverhältnisse feststellbar</li> </ul>
II	<ul style="list-style-type: none"> <li>- überwiegend Aufnahmeflächen des Fichten-Birken-Stratums</li> <li>- relativ geringe Streuung =&gt; Aufnahmeflächen floristisch sehr ähnlich</li> </ul>
III	<ul style="list-style-type: none"> <li>- homogenste Gruppe, da sie fast ausschließlich Aufnahmeflächen aus dem Fichten-Stratum aufweist</li> <li>- relativ geringe Streuung =&gt; Aufnahmeflächen floristisch sehr ähnlich.</li> <li>- charakterisiert wird diese Gruppe vor allem von den Keimlingen der Baumart Gemeine Fichte (<i>Picea abies</i>) =&gt; hier Deckungsgradschwerpunkt</li> </ul>

Einige wenige Aufnahmeflächen wurden keinen Gruppen zugeordnet und stehen floristisch zwischen den genannten drei Gruppen.

### Waldartenspektrum

Für die ökologische Beurteilung der auftretenden Arten ist in Abb. 36a das qualitative Waldartenspektrum für die Krautschicht in den drei Straten dargestellt. Demgegenüber ist zusätzlich das quantitative Waldartenspektrum mit Berücksichtigung der Stetigkeiten der einzelnen Arten in den Straten erstellt worden (Abb. 36b nach den Anlagen 14 und 15). Dabei bedeutet qualitativ das prozentuale Auftreten von Arten in den sechs Kategorien (S2.1, K1.1, K1.2, K2.1, K2.2 und V). Für das quantitative Waldartenspektrum wurden von den Arten einer Kategorie die prozentualen Stetigkeiten aus Anlage 15 im jeweiligen Stratum addiert. Danach konnte der Gesamtanteil in Prozent für dieses Stratum berechnet werden. Das verdeutlicht, dass qualitativ betrachtet die Arten der Krautschicht, die vorwiegend im geschlossenen Wald zu finden sind, ähnlich hohe Werte im Fichten- und Birken-Stratum zeigen (Abb. 36a). Das Fichten-Birken-Stratum weist dabei die geringsten Werte auf. Straucharten, die im Wald wie im Offenland vorkommen, finden sich vorrangig im Übergangsbereich. Die Arten, die vorwiegend an Waldrändern und Waldlichtungen auftreten, sind prozentual am stärksten im Birken-Stratum vertreten. Krautschichtarten, die sowohl im Wald wie im Offenland zu finden sind, entwickeln ihre höchsten Werte unter Fichte-Birke, gefolgt vom Fichten- und dann vom Birken-Stratum (Abb. 34a). Bei Arten der

Krautschicht, die im Wald vorkommen, aber ihren Schwerpunkt im Offenland haben, sind in allen drei Straten ähnliche Tendenzen zu beobachten. Bei der Verjüngung der Baumarten schneidet das Fichten-Stratum qualitativ gesehen am besten ab, gefolgt vom Birken-Stratum. Wesentlich niedrigere Verjüngungswerte bietet das Fichten-Birken-Stratum.

Quantitativ gesehen sieht das Bild insgesamt anders aus. Die Arten der Krautschicht, die vorwiegend im geschlossenen Wald zu finden sind, haben ihr höchstes prozentuales Auftreten im Fichten-Stratum (Abb. 34b). Die Arten, die vorwiegend an Waldrändern und Waldlichtungen auftreten, sind prozentual am stärksten im Birken-Stratum vertreten. Krautschichtarten, die sowohl im Wald wie im Offenland existieren, zeigen ebenfalls ihre höchsten Werte unter Birke (Abb. 34b). Die gleiche Tendenz ist für die Arten der Krautschicht zu beobachten, die im Wald vorkommen, aber ihren Schwerpunkt im Offenland haben. Hinsichtlich der Verjüngung der Baumarten schneidet das Birken-Stratum quantitativ gesehen am schlechtesten ab. Wesentlich höhere Verjüngungswerte stellen sich dagegen im Fichten-Birken-Stratum dar. Dazwischen liegt das Fichten-Stratum.

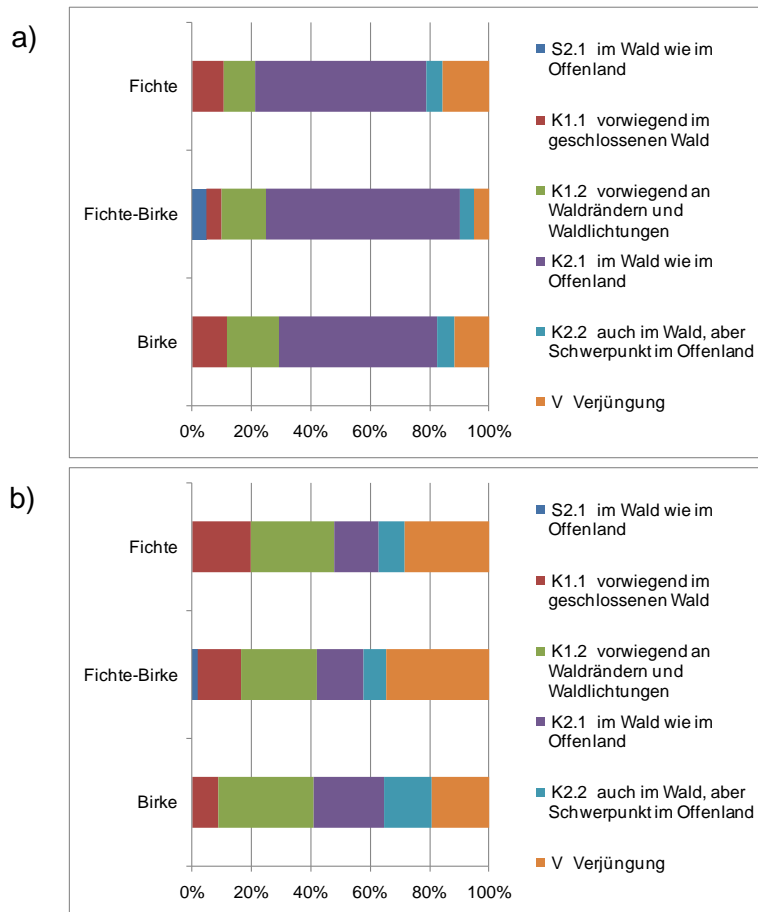


Abb. 36: a) Qualitatives Waldartenspektrum der Krautschicht und b) Quantitatives Waldartenspektrum der Krautschicht (unter Berücksichtigung der Stetigkeiten) jeweils nach (SCHMIDT et al. 2003)

In Anlage 14 sind zusätzlich die soziologisch-ökologischen Artengruppen nach PASSARGE und HOFMANN (1964) aufgelistet. Diese stehen aber nur für einen Teil der kartierten Sippen zur Verfügung und sollen deshalb an dieser Stelle lediglich erwähnt werden.

#### Zeigerwerte nach Ellenberg

Die Zeigerwerte nach ELLENBERG et al. (2001) dienen zur weiteren Charakterisierung der Bodenvegetation (vgl. Anlage 11). Die Straten werden hinsichtlich der Licht-, Feuchte-, Reaktions- und Stickstoffzahlen der Krautschicht verglichen. Sippen, die für die jeweilige Zeigerwertkategorie als indifferent gelten, sind nicht berücksichtigt worden. Die Kontinentalitätszahl und die Temperaturzahl befinden sich nicht in der Analyse, weil eine Differenzierung dieser bei der Bodenvegetation zwischen den Straten nicht anzunehmen ist.

### Krautschicht

Mit Hilfe der Lichtzahl kann das Vorkommen von Arten in Beziehung zur relativen Beleuchtungsstärke beschrieben werden. Aus Abb. 37 ist abzulesen, dass die drei Straten im Verhältnis zur gesamten Verteilung der mittleren Lichtzahl einander relativ ähnlich sind. Die Spannweite der Werte ist, wenn man den sehr niedrigen Wert im Fichten-Stratum unberücksichtigt lässt, bei allen Straten mit 2,5 etwa gleich. Jedoch unterscheiden sie sich bezüglich der Schwerpunkte der Verteilung. So ist der Median der mittleren Lichtzahl im Fichten-Stratum mit 4,88 etwa eine halbe Einheit geringer als die Mediane der beiden anderen Straten, die mit 5,6 bzw. 5,5 etwa gleich sind. Der geringste Wert der mittleren Lichtzahl liegt im Fichten-Stratum (1,0). Die Aufnahmefläche mit dem höchsten Wert befindet sich im Birken-Stratum (6,2), wobei der Unterschied zum Fichten-Birken-Stratum gering ist (6,1).

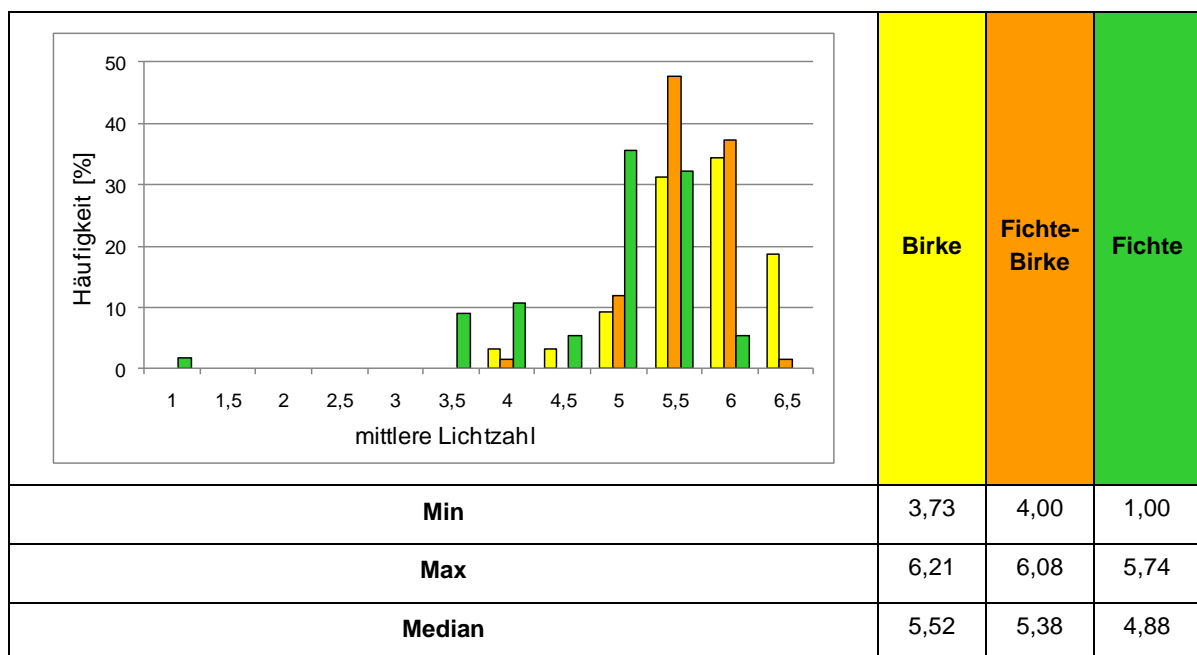


Abb. 37: Relative Häufigkeit der mittleren Lichtzahl der Krautschicht (KS) für die drei Straten

Nach ELLENBERG et al. (1992) ist es durch die Feuchtezahl möglich, das Vorkommen von Arten im Gefälle der Bodenfeuchtigkeit vom flachgründig-trockenen Felshang bis zu sumpfigen Bedingungen zu beschreiben. Während das Fichten-Stratum beim Vergleich der mittleren Feuchtezahlen (Abb. 38) relativ weit verteilt ist (3 bis 8), liegen das Birken- und das Fichten-Birken-Stratum in einem engeren Bereich von 4,5 bis 7 mittlerer Feuchte. Tendenziell befinden sich mehr Aufnahmeflächen in Bereichen höherer mittlerer Feuchtezahlen im Birken- und im Fichten-Birken-Stratum. Das Fichten-Stratum weist im Vergleich mit den beiden anderen Straten vorwiegend geringere mittlere Feuchtezahlen auf, wobei



Maximalwerte höher und Minimalwerte niedriger sind als in den anderen beiden Straten. Deutlich zu erkennen ist auch, dass die Straten Birke- und Fichte-Birke im Mittel die gleiche mittlere Feuchtezahl in der Krautschicht zeigen (etwa 6,1). Beim Fichten-Stratum wurde dagegen eine um ca. eine halbe Einheit geringere mittlere Feuchtezahl festgestellt (5,7).

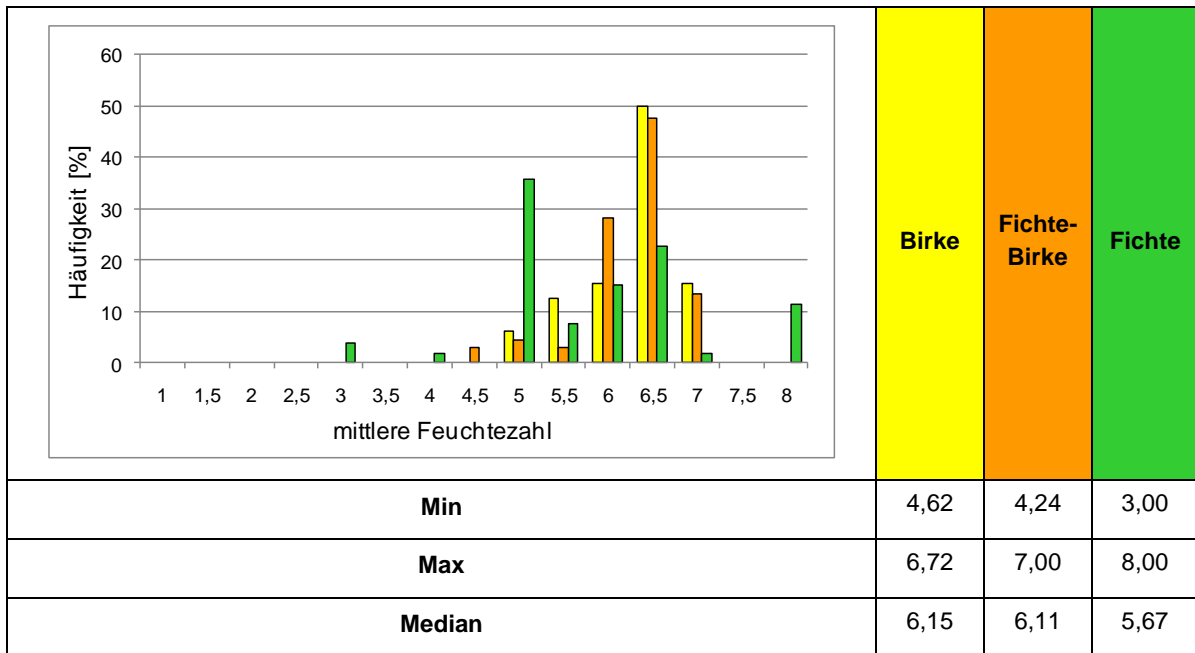


Abb. 38: Relative Häufigkeit der mittleren Feuchtezahl der Krautschicht (KS) für die drei Straten

Die Straten Birke- und Fichte-Birke verteilen sich bezüglich der Reaktionszahl, die das Vorkommen von Arten im Gefälle der Bodenreaktion und des Kalkgehaltes beschreibt, (Abb. 39) über eine ähnliche Spanne an Zeigerwertklassen. Im Fichten-Stratum liegt dagegen eine in den höheren Zeigerwertbereich ausgedehnte Verteilung vor. Das Fichten-Birken-Stratum ist uneinheitlicher verteilt als die beiden anderen Straten. Etwa 35 % aller Werte liegen in einem Bereich von 2. Daneben gibt es einen weiteren Schwerpunkt in der Verteilung der Aufnahmeflächen. Rund 25 % aller Werte des Fichten-Birken-Stratums befinden sich im Bereich 3. Die Verteilung der mittleren Reaktionszahl der Aufnahmeflächen des Birken-Stratums ist, wie die der Aufnahmeflächen des Fichten-Stratums, eingipflig. Bei Letzterem sind annähernd 30 % der Aufnahmeflächen in der Klasse 4, während es im Birken-Stratum etwas mehr als 30 % sind, die in der Klasse 3,5 liegen. Die kleinste Spannweite der Werte weist das Birken-Stratum auf (2 bis 4,1). Eine durchschnittliche Spannweite der mittleren Reaktionszahl zeigt das Fichten-Birken-Stratum (1,1 bis 4,4). Die größte Spannweite wurde für das Fichten-Stratum mit einem Wertebereich von 2 bis 7 ermittelt. Der niedrigste Wert der mittleren Reaktionszahl ist im Fichten-Birken-Stratum, der höchste im Fichten-Stratum zu finden.

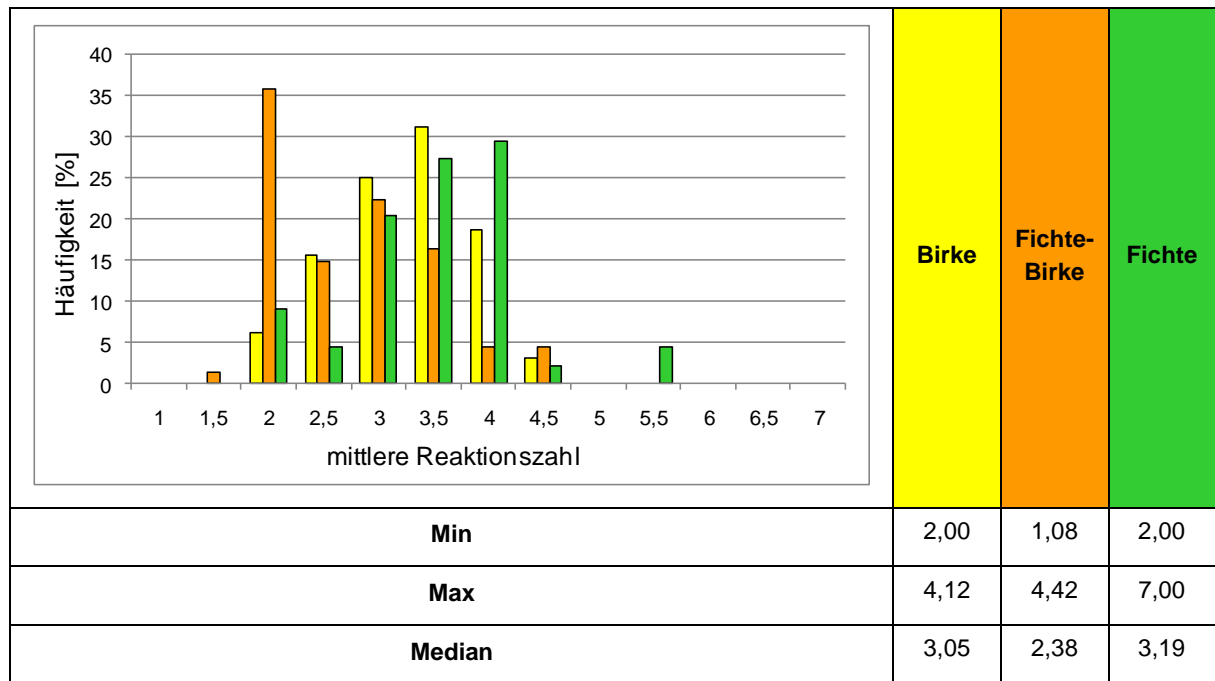


Abb. 39: Relative Häufigkeit der mittleren Reaktionszahl der Krautschicht (KS) für die drei Straten

Mit Hilfe der Stickstoffzahl kann das Vorkommen von Arten im Gefälle der Mineralstickstoffversorgung während der Vegetationszeit veranschaulicht werden. Die Verteilung der mittleren Stickstoffzahl auf den Aufnahme­flächen in den einzelnen Straten ist in Abb. 40 dargestellt. Die Spannweite des Fichten-Birken-Stratums ist vergleichbar mit jener des Fichten-Stratums (2,5 bis 6 bzw. 2,5 bis 6,5). Dagegen ist die Verteilung der mittleren Stickstoffzahl im Birken-Stratum über einen kleineren Wertebereich gespannt (4 bis 6).

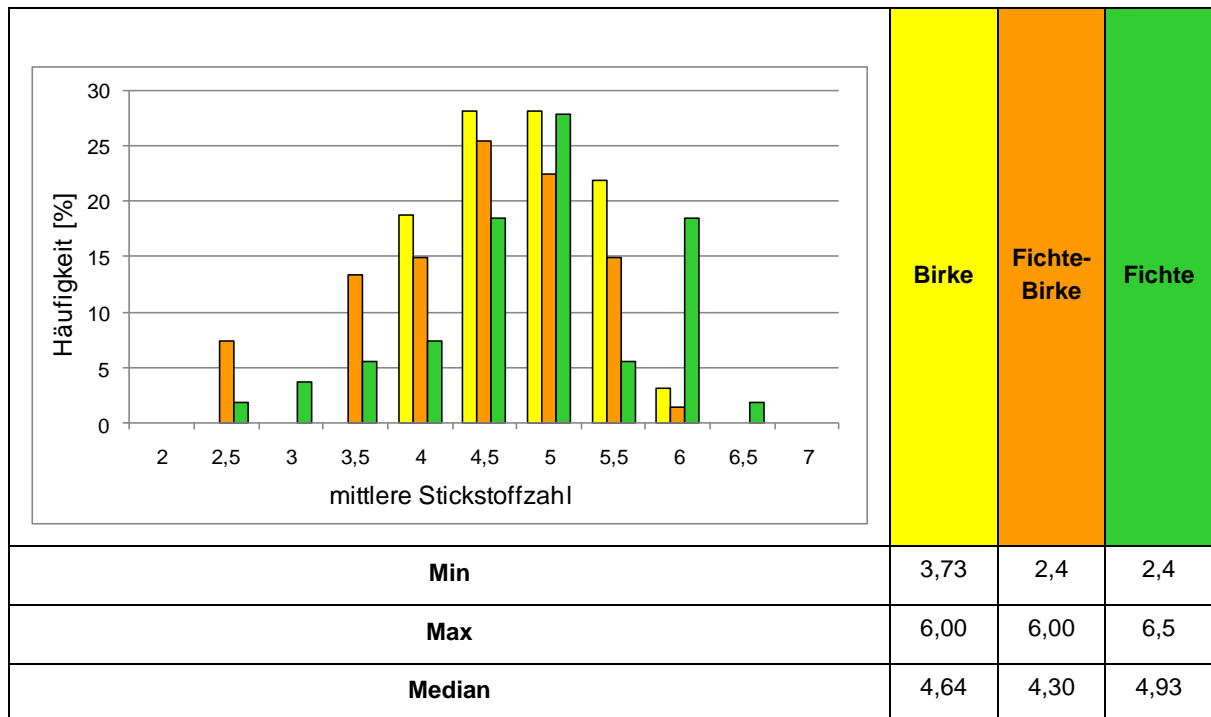


Abb. 40: Relative Häufigkeit der mittleren Stickstoffzahl der Krautschicht für die drei Straten

### Moosschicht

Tab. 23 gibt eine Übersicht über die Zeigerwerte nach Ellenberg für die Moosschicht. Da es keine Stickstoffzahlen für die Moose gibt, entfällt dieses Kriterium.

Tab. 23: Kennwerte der Verteilung der mittleren Lichtzahl (mL), Feuchtezahl (mF) und Reaktionszahl (mR) der Moosschicht (MS) nach Straten

Zeigerwert nach Ellenberg für MS	Birke	Fichte-Birke	Fichte
Min mL	4,42	3,75	4,43
Max mL	6,45	7,00	5,94
Median mL	5,30	5,25	5,00
Min mF	4,00	4,00	4,00
Max mF	5,45	6,00	6,00
Median mF	4,57	4,56	4,00
Min mR	3,00	1,25	2,57
Max mR	5,00	5,00	6,00
Median mR	4,00	2,50	4,31

Die mittleren Lichtzahlen der Moosschicht der drei Straten differenzieren sich von den Verhältnissen in der Krautschicht wie nachfolgend dargestellt. Die größte Spannweite der Werte hat das Fichten-Birken-Stratum mit mehr als 3 Einheiten mittlerer Lichtzahl. Die Moosschicht dieses Stratums weicht dabei von den anderen zwei Straten und von der Krautschicht ab. Im Fichten-Stratum ist die Variabilität in Moosschicht geringer als in der Krautschicht.

Der Median der Feuchtezahl der Moosschicht ist für das Fichten-Stratum am geringsten. Die Mediane der mittleren Reaktionszahlen in der Moosschicht machen das gleiche Muster wie in der Krautschicht sichtbar. Den geringsten Wert hat das Fichten-Birken-Stratum mit 2,5. Es liegt damit auf dem Niveau der Krautschicht. Das Birken-Stratum besitzt einen Median von 4, der mit etwa 1,5 Einheiten deutlich höher ist als der des Fichten-Birken-Stratums, jedoch 0,3 Einheiten kleiner als der Median des Fichten-Stratums (4,3).

#### **Deckungsgrad**

In Abb. 41 sind die addierten Deckungsgrade der Kraut- und Moosschicht getrennt nach den drei Straten dargestellt. Auf der Abszisse sind Deckungsgradklassen in Prozent der Bedeckung der Aufnahme­fläche aufgetragen. Die Abstufung der Klassen erfolgt in Schritten von 20 %. Deutlich zu erkennen ist, dass sich das Fichten-Stratum stark von den beiden anderen Straten abhebt. Der Schwerpunkt der Deckungsgrade in den Aufnahme­punkten liegt mit fast 80 % in der Deckungsgradklasse 20 %. Dagegen liegt der Schwerpunkt des Fichten-Birken-Stratums in der 120 %-Klasse nahe an dem des Birken-Stratums (140 %-Klasse). In diesen beiden Straten ist die Bodenvegetation z. T. auch mehrschichtig.

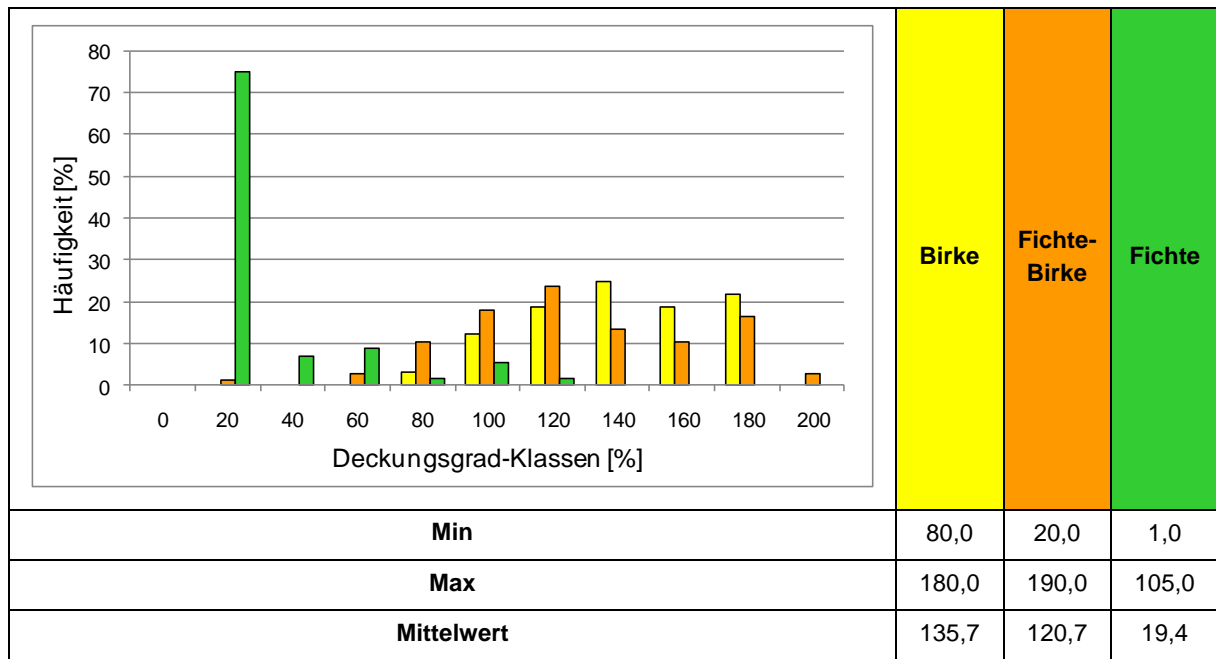


Abb. 41: Deckungsgrad der Kraut- (KS) und Moosschicht (MS) nach Straten

Das Fichten-Birken-Stratum weist die höchste Bandbreite der Deckungsgrade auf (20 bis 190 %). Die Spannweite der anderen beiden Straten ist vergleichbar, allerdings nicht die Deckungsgrad-Klassen. Im Birken-Stratum liegen sie mit 80 bis 180 % deutlich höher als im Fichten-Stratum mit 20 bis 120 %.

Beim Blick auf die beiden einzelnen Schichten (Tab. 24) ist festzustellen, dass sich für das Minimum der Deckungsgrade in der Krautschicht die nachstehende Abfolge ergibt: Birke > Fichte-Birke > Fichte. Die gleiche Reihenfolge ist für die Mittelwerte der Deckungsgrade in der Kraut- und Moosschicht ersichtlich. Bei den Maxima hebt sich in beiden Schichten das Fichten-Stratum mit den geringsten Werten von den anderen beiden ab.

Tab. 24: Kennwerte des Deckungsgrades nach Straten getrennt nach Kraut- (KS) und Moosschicht (MS)

D°	Birke	Fichte-Birke	Fichte
Min (KS)	40,0	10,0	1,0
Max (KS)	100,0	100,0	80,0
Mittel (KS)	90,5	85,7	14,4
Min (MS)	0,0	0,0	0,0
Max (MS)	95,0	95,0	35,0
Mittel (MS)	45,2	35,0	5,0

Das Fichten-Stratum unterscheidet sich bei den Deckungsgraden der Bodenvegetation von den Straten Birke und Fichte-Birke. Zwischen den letztgenannten sind die Differenzen geringer. Eine Reihenfolge der Straten, bezogen auf den Deckungsgrad der Bodenvegetation, gestaltet sich wie folgt:  $Fi << FiBi < Bi$ .

#### 4.2.3 Vergleich der Sippenanzahlen, Deckungsgrade sowie qualitativer Aspekte für die beiden Untersuchungsflächen im Gesamten

Dieses Kapitel gibt einen Gesamtüberblick über die kartierte Bodenvegetation der beiden Untersuchungsflächen. Dabei werden Sippenanzahl und Deckungsgrade jeweils sowohl für die Kraut- und Moosschicht zusammen als auch getrennt für beide Schichten dargestellt. Außerdem wird noch ein Vergleich zwischen den beiden Bestandessituationen bezüglich aller vorkommenden Sippen gezogen.

Da die Daten nur punktuell erfasst werden konnten, wird die räumliche Statistik herangezogen, um die Daten räumlich darzustellen. Die dreidimensionale grafische Darstellung der räumlichen Variabilität der Bodenvegetation (Sippenanzahl, Deckungsgrade) in den beiden Versuchsflächen erfolgte mittels der Programme CoStat und CoPlot (Abb. 42a und b, Abb. 43a und b sowie Abb. 44a und b). Dabei wurden die Daten mit Hilfe der Grid-Funktion dieses Programmes transformiert (Wichtungsfunktion:  $1/Distanz^2$ , Suchvorgang: Quadrant, n-Punkte pro Richtung: 2). So entstehen teils linienförmige Strukturen, die in der Natur so nicht zu finden sind. Die Abbildungen sind deshalb nicht als Abbildung der Realität zu verstehen, sondern sollen nur verdeutlichen, welche Sippenanzahlen auf den Untersuchungsflächen zu finden waren und wie sie ungefähr verteilt sind.

### Sippenanzahl

Abb. 42a und b (für die Kraut- und Moosschicht) zusammen sowie Abb. 43a und b (nur für die Krautschicht) und Abb. 44a und b (nur für die Moosschicht) lassen erkennen, dass ähnlich hohe Sippenanzahlen in den beiden Bestandessituationen vorkommen. Zum besseren Verständnis der sechs Grafiken sind in Abb. 45a und b nochmals die Stammverteilungspläne aus dem Methodenkapitel für die beiden Untersuchungsflächen dargestellt.

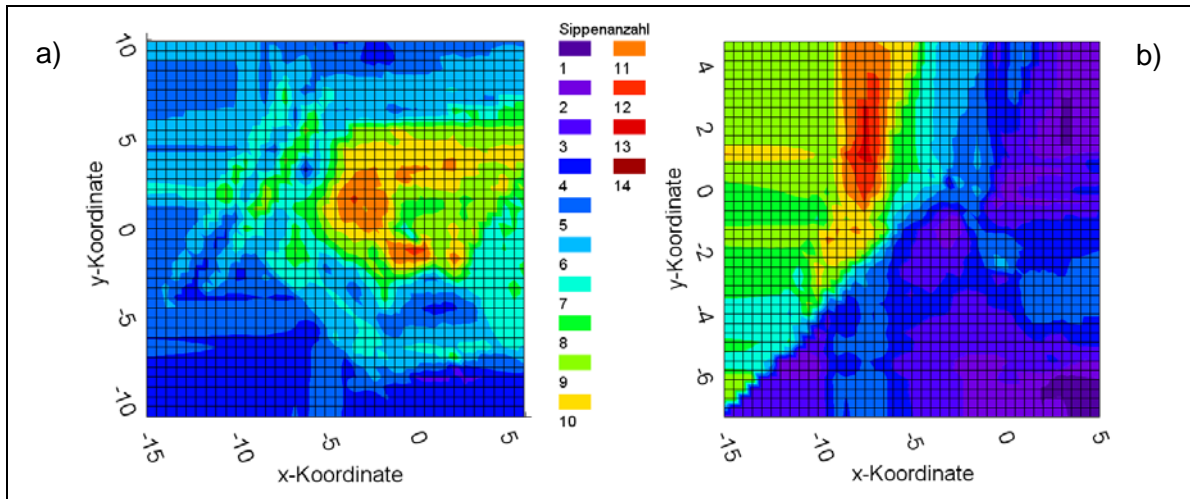


Abb. 42: Sippenanzahl der Kraut- und Moosschicht a) unter Fichte-Birke sowie b) unter reiner Fichte, Position des Zentralstammes jeweils bei  $x = 0$  und  $y = 0$

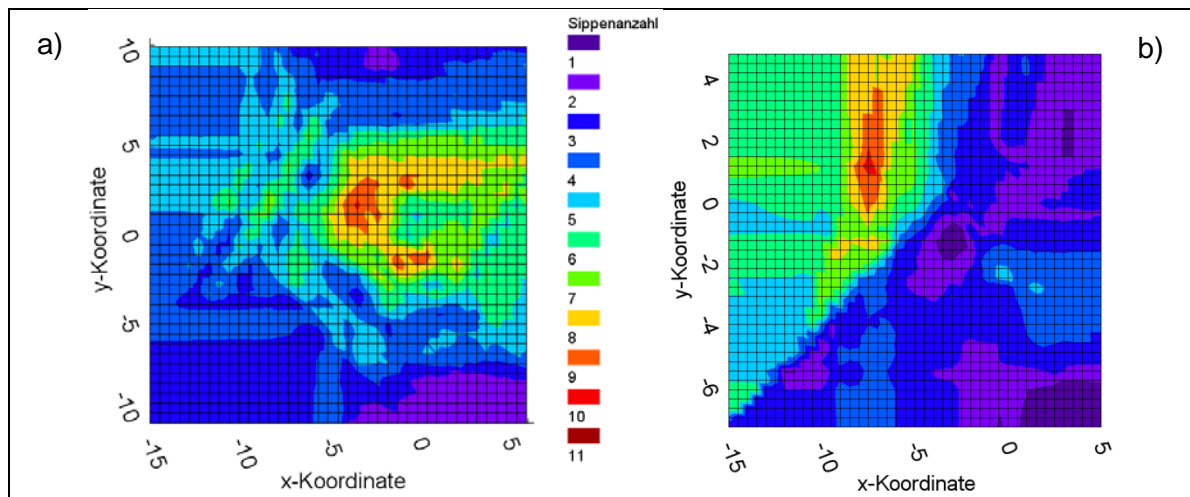


Abb. 43: Sippenanzahl der Krautschicht a) unter Fichte-Birke sowie b) unter reiner Fichte, Position des Zentralstammes jeweils bei  $x = 0$  und  $y = 0$

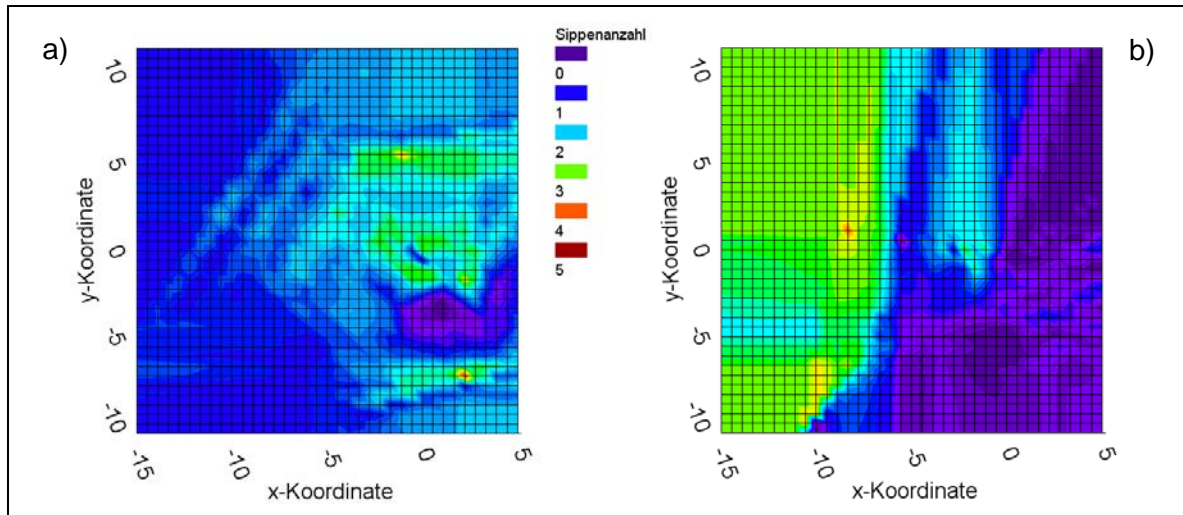


Abb. 44: Sippenanzahl der Mooschicht a) unter Fichte-Birke sowie b) unter reiner Fichte, Position des Zentralstammes jeweils bei  $x = 0$  und  $y = 0$

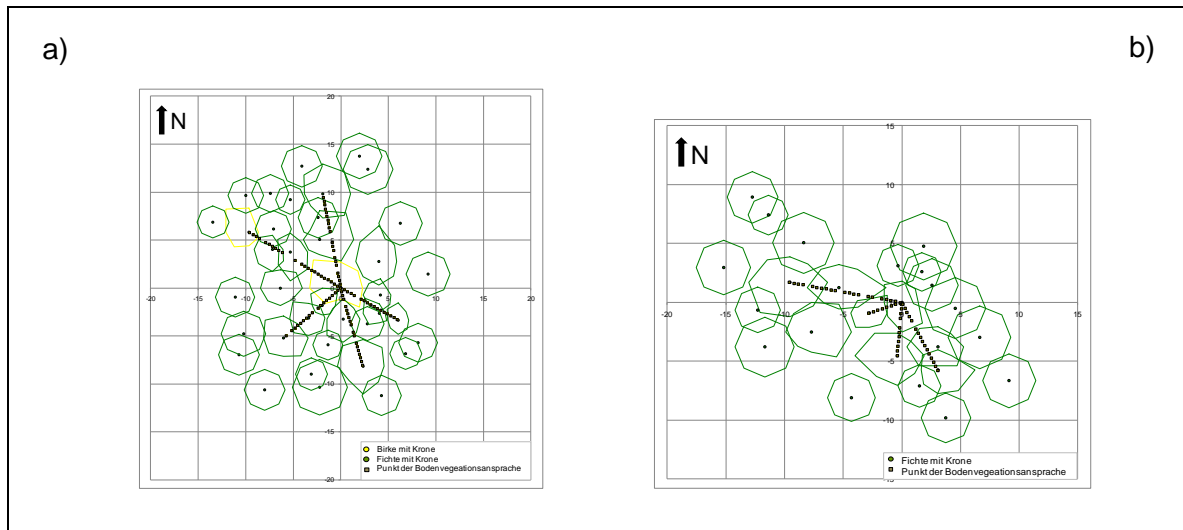


Abb. 45: Stamm- und Probepunkteverteilungspläne für die Bodenvegetationsansprache a) bei einzelbaumweiser Einmischung von Birke in Fichte sowie b) von reiner Fichte

Tab. 25 gibt einen Überblick über alle vorkommenden Sippen auf den beiden Untersuchungsflächen. Die Sippen *Carex pilulifera* L., *Digitalis purpurea* L., *Dryopteris dilatata* (Hoffm.) A. Gray, *Poa nemoralis* L., *Rubus idaeus* L., *Brachythecium salebrosum* (Web. & Mohr), *Hypnum cupressiforme* Hedw. sowie *Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske traten nur in der Fichten-Birken-Untersuchungsfläche auf. Hingegen kamen die fünf Sippen *Epilobium angustifolium* L., *Fagus sylvatica* L., *Dicranella heteromalla* (Hedw.) Schimp., *Eurhynchium praelongum* (Hedw.) Schimp. und *Plagiothecium denticulatum* (Hedw.) Schimp. nur unter reiner Fichte vor.



Tab. 25: Vergleich beider Bestandessituationen hinsichtlich des Auftretens einzelner Sippen

vorkommende Sippen + ... vertreten; - ... nicht vertreten	Fichten-Birken- Mischbestand	reiner Fichtenbestand
<b>Krautschicht</b>		
<i>Calamagrostis villosa</i> (Chaix) J. F. Gmel. (Wolliges Reitgras)	+	+
<i>Cardamine flexuosa</i> With. (Wald-Schaumkraut)	+	+
<i>Carex pilulifera</i> L. (Pillen-Segge)	+	-
<i>Deschampsia flexuosa</i> (L.) Trin. (Draht-Schmiele)	+	+
<i>Digitalis purpurea</i> L. (Roter Fingerhut)	+	-
<i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H. P. Fuchs (Gewöhnlicher Dornfarn)	+	+
<i>Dryopteris dilatata</i> (Hoffm.) A. Gray (Breitblättriger Dornfarn)	+	-
<i>Epilobium angustifolium</i> L. (Wald-Weidenröschen)	-	+
<i>Epilobium montanum</i> L. (Berg-Weidenröschen)	+	+
<i>Fagus sylvatica</i> L. (Rotbuche)	-	+
<i>Galium saxatile</i> L. (Sand-Labkraut)	+	+
<i>Moehringia trinervia</i> (L.) Clairv. (Dreinervige Nabelmiere)	+	+
<i>Mycelis muralis</i> (L.) Dum. (Mauerlattich)	+	+
<i>Oxalis acetosella</i> L. (Wald-Sauerklee)	+	+
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karsten (Gemeine Fichte)	+	+
<i>Poa nemoralis</i> L. (Hain-Rispengras)	+	-
<i>Rubus idaeus</i> L. (Himbeere)	+	-
<i>Senecio ovatus</i> (G. M. Sch.) Willd. (Fuchssches Geiskraut)	+	+
<i>Sorbus aucuparia</i> L. (Vogelbeere)	+	+
<i>Stellaria media</i> (L.) Vill. (Gewöhnliche Vogelmiere)	+	+
<i>Taraxacum officinale</i> sect. <i>Ruderalia</i> Kirschn. (Gewöhnlicher Löwenzahn)	+	+
<i>Urtica dioica</i> L. (Große Brennessel)	+	+
<i>Vaccinium myrtillus</i> L. (Heidelbeere)	+	+
<i>Veronica officinalis</i> L. (Wald-Ehrenpreis)	+	+
<b>Moosschicht</b>		
<i>Brachythecium rutabulum</i> (Hedw.) (Gemeines Kurzbüchsenmoos)	+	+
<i>Brachythecium salebrosum</i> (Web. & Mohr) (Glattstieliges Kurzbüchsenmoos)	+	-
<i>Brachythecium velutinum</i> (Hedw.) Schimp. (Samt-Kurzbüchsenmoos)	+	+
<i>Dicranella heteromalla</i> (Hedw.) Schimp. (Sicheliges Kleingabelzahnmoos)	-	+
<i>Dicranum scoparium</i> Hedw. (Besenmoos)	+	+
<i>Eurhynchium praelongum</i> (Hedw.) Schimp. (Langblättriges Schönschnabelmoos)	-	+
<i>Hypnum cupressiforme</i> Hedw. (Zypressen-Schlafmoos)	+	-
<i>Lophocolea bidentata</i> (L.) Dum. (Zweizähliges Kammkelchmoos)	+	+
<i>Lophocolea heterophylla</i> (Schr.) Dum. (Verschiedenblättriges Kammkelchmoos)	+	+
<i>Mnium hornum</i> Hedw. (Schwanenhals-Sternmoos)	+	+
<i>Plagiothecium denticulatum</i> (Hedw.) Schimp. (Zahn-Plattmoos)	-	+
<i>Plagiothecium curvifolium</i> Schlieph. Ex Limpr. (glänzendes Plattmoos)	+	+
<i>Polytrichum formosum</i> Hedw. (Schönes Widertonmoos)	+	+
<i>Sanionia uncinata</i> (Hedw.) Loeske (Hakenmoos)	+	-
<i>Thuidium tamariscinum</i> (Hedw.) Schimp. (Tamarisken-Thujamoos)	+	+
<b>Summe der vorkommenden Sippen</b>	<b>34</b>	<b>31</b>

## Deckungsgrad

Abb. 46a und b verdeutlichen den Gesamtdeckungsgrad. Dabei wurden für die Krautschicht maximal 100 % Deckungsgrad vergeben und ebenfalls maximal 100 % für die Moosschicht. So ist es möglich, beide Schichten getrennt darzustellen. Durch diese zweischichtige Betrachtung können bei der Addition zum Gesamtdeckungsgrad über 100 % bis 200 % auftreten. Abb. 45a und b sind erneut zur besseren Interpretation der Deckungsgradgrafiken Abb. 46 bis Abb. 48 herangezogen worden. Abb. 47a und b beschreiben nur die Krautschicht und Abb. 48a und b nur die Moosschicht. Es sei nochmals betont, dass diese Darstellungen, wie bei der Sippenanzahl, durch eine Transformation mit Hilfe einer Grid-Funktion erstellt wurden, wodurch z. T. linienförmige Strukturen entstehen, die in der Natur so nicht zu finden sind. Die Abbildungen sind deshalb nicht als Ab-

bildung der Realität zu verstehen. Sie sollen hier auch lediglich verdeutlichen, welche Deckungsgrade auf den Untersuchungsflächen zu finden waren und wie sie ungefähr verteilt sind. Dabei zeigen sich sowohl für die Gesamtdeckung als auch für die Kraut- und Moos-schicht einzeln betrachtet im Fichten-Birken-Bereich wesentlich höhere Deckungsgrade als im reinen Fichtenteil (Abb. 46 bis Abb. 48).

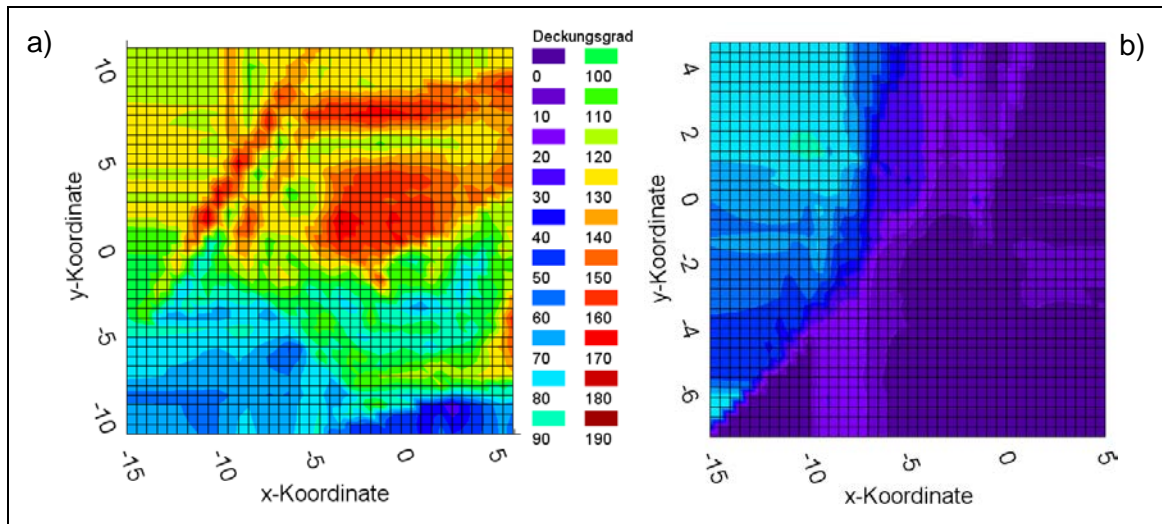


Abb. 46: Deckungsgrad der Kraut- und Mooschicht zusammen a) unter Fichte-Birke sowie b) unter reiner Fichte, Position des Fichtenzentralstammes jeweils bei  $x = 0$  und  $y = 0$

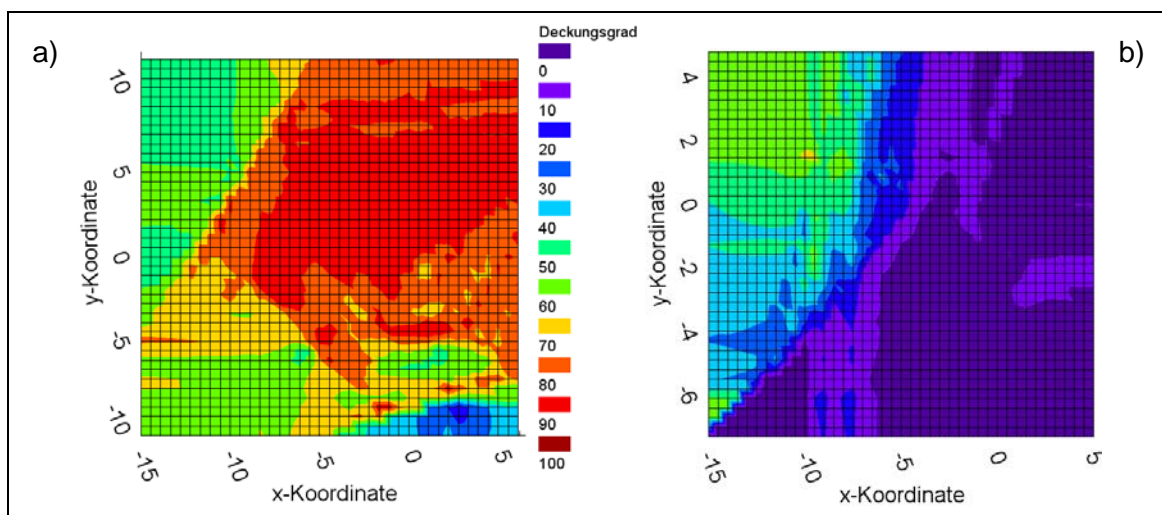


Abb. 47: Deckungsgrad der Krautschicht a) unter Fichte-Birke sowie b) unter reiner Fichte, Position des Zentralstammes jeweils bei  $x = 0$  und  $y = 0$

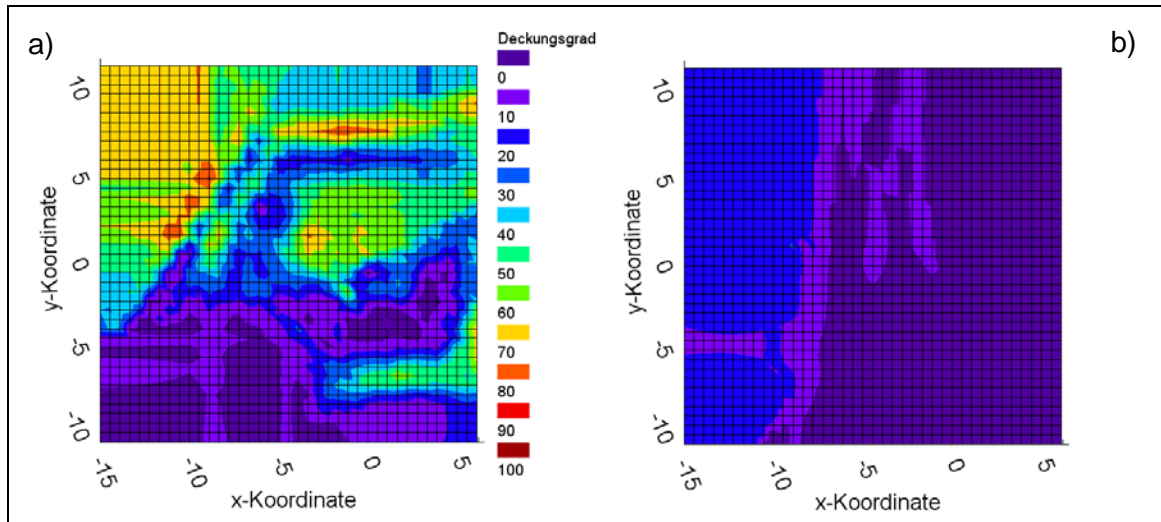


Abb. 48: Deckungsgrad der Moosschicht a) unter Fichte-Birke sowie b) unter reiner Fichte, Position des Zentralstammes jeweils bei  $x = 0$  und  $y = 0$

### **Fazit:**

In Kap. 4.2.1 ist erkennbar, dass sich die Sippenanzahl der Bodenvegetation sowohl unter reiner Fichte als auch in Mischung von Fichte und Birke vor allem mit zunehmender Annäherung zum Kronenrand erhöht. In Stammnähe treten oft nur geringe Sippenanzahlen auf. Desweiteren zeigen viele Sippen unterschiedliche Mächtigkeiten entlang der Transekte. Mit Sicht auf die Deckungsgrade ist festzuhalten, dass höhere Deckungsgrade auf dem Fichten-Birken-Transekt vorliegen. Dabei ist die Heterogenität in der Moosschicht auf dem Fichten-Birken-Transekt am größten. Der Deckungsgrad weist besonders in der Moosschicht entlang des Fichten-Birken-Transekts deutliche Variationen auf. Das darauf folgende Kap. 4.2.2 macht deutlich, dass es klare Unterschiede zwischen den Straten bei den Sippenanzahlen gibt. Relativ geringe Sippenanzahlen treten im Fichten-Stratum, mittlere im Fichten-Birken-Stratum und hohe im Birken-Stratum auf. Auch bei den Deckungsgraden sind die Werte unter Fichte die kleinsten.

Durch Kap. 4.2.3 wird sichtbar, dass bei der Gesamtbetrachtung der Untersuchungsflächen im Fichten-Birken-Teil ähnlich hohe Sippenanzahlen wie im Fichtenbereich zu finden sind. Einige Sippen kommen entweder nur in der Mischfläche oder nur in der reinen Fichtenfläche vor. Bei den Deckungsgraden zeigen sich sowohl für die Gesamtdeckung als auch für die Kraut- und Moosschicht im Fichten-Birken-Bereich wesentlich höhere Deckungsgrade als im reinen Fichtenteil. Bei den Vegetationsanalysen können also eindeutige Mischungseffekte durch einzelbaumweise eingemischte Birken nachgewiesen werden.

### **4.3 Streumenge und -verteilung**

Mit Hilfe von Streufängen entlang von Transekten war es möglich, die Streumenge sowie -verteilung zu bestimmen (vgl. Kap. 3.5). In den Streufallen waren in  $> 20$  m Entfernung von der Zentralbirke keine Birkenblätter mehr zu finden (Abb. 49). Auch in  $> 16$  m Entfernung tauchten kaum noch nennenswerte Trockenflusssichten auf, soweit sich keine weitere Birke in der Nähe befand. Nur in einer Falle (durch Pfeil markiert) waren noch 1,4 g Laub in  $> 16$  m Entfernung zu finden. Zum einen können die Ursachen in einer anisotropen Verteilung der Blätter liegen. Andererseits ist aber eine Überlagerung mit der Blattstreu der benachbarten Birke wahrscheinlich, die durch das Modell WaldStat 7.0 herausgerechnet wurde (Methodik vgl. Kap. 3.5).

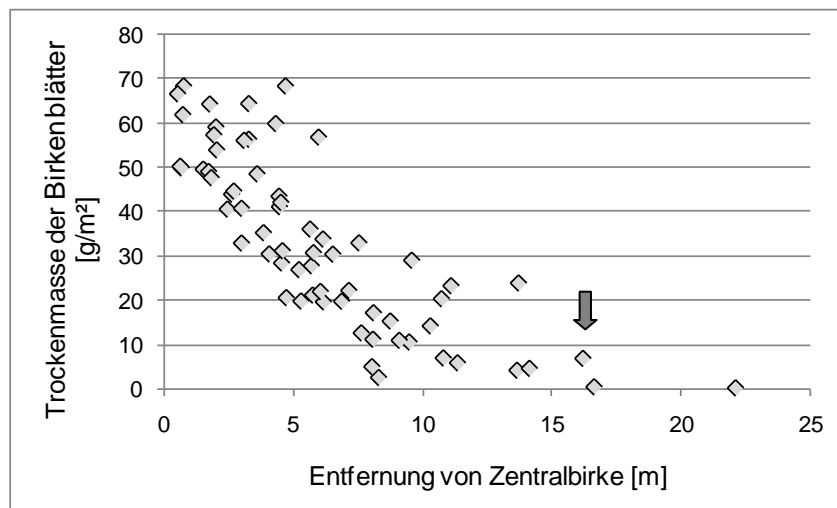
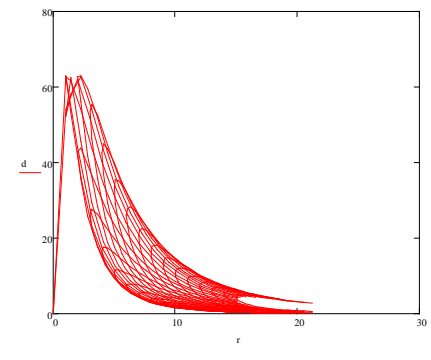


Abb. 49: Birkentrockenmassen in Abhängigkeit von der Entfernung zur Zentralbirke

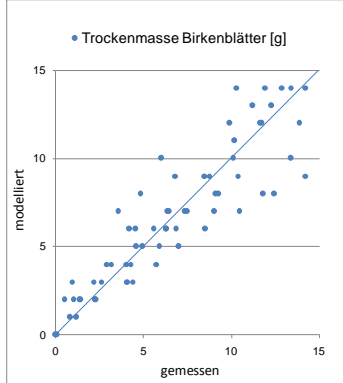
Für die erste Berechnung mit dem Programm WaldStat 7.0 sind die Zentralbirke und die Birken, die im Umkreis von 35 m (8 Birken) liegen, sowie 65 Fallen in die Berechnung einbezogen worden (Tab. 26).

Tab. 26: Lognormal-Modell mit Anisotropie (Richtungseffekt: verallg. Mises-Modell) der Trockenmasse der Birkenblätter für den Bereich Birke in Fichte für die Baumart Birke (Modellierung mit Birken im Umkreis von 35 m)

Modelle	<b>Lognormal-Modell mit Anisotropie und Maximum-Likelihood-Funktion</b>	
Parameter	$\beta = 2$ Verteilungsparameter $\mu = 1,96$ Verteilungsparameter $\sigma = 0,92$ Anisotropieparameter $k = 0,46$ Anisotropieparameter $u = 0,85$ Anisotropieparameter $v = -0,21$	
Ergebnisse	mittlere Ausbreitung [m] = 9,48 Gesamt-trockenmasse [g] für eine Birke (BHD=37,9 cm) = 7672,4	
Strafterme	AIC: 266,88 BIC: 282,10	
Fehler	2,86	

Unterschiedliche Berechnungen mit WaldStat 7.0 machten deutlich, dass das Lognormal-Modell mit Anisotropie die beste Anpassung zeigt. Neben der ökologischen Plausibilität und den Werten der Strafterme AIC und BIC diene u. a. auch die Korrelation zwischen den gemessenen und modellierten Werten der Suche nach dem besten Modell (Tab. 27).

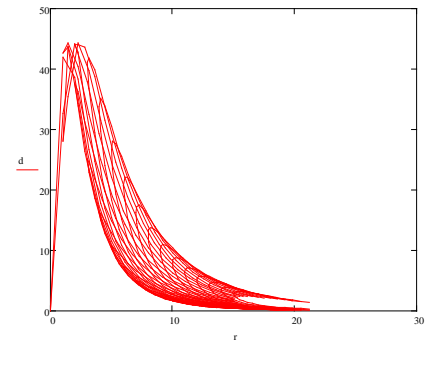
Tab. 27: Korrelation für das Lognormal-Modell mit Anisotropie (Richtungseffekt: verallg. Mises-Modell) der Trockenmasse der Birkenblätter für den Bereich Birke in Fichte

		gemessen	modelliert	
gemessen	Korrelation nach Pearson	1,000	,900**	
	Signifikanz (2-seitig)		,000	
	N	65	65	
modelliert	Korrelation nach Pearson	,900**	1,000	
	Signifikanz (2-seitig)	,000		
	N	65	65	

\*\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

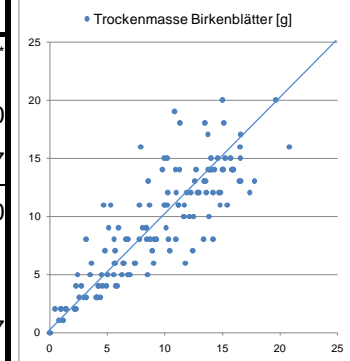
Um noch mehr Fallen und Bäume in die Modellierung zu integrieren, wurde ein zweites Messfeld hinzugezogen. So konnte die Modellierung mit 40 Birken und 137 Fallen für einen Referenzbaum mit einem BHD von 37,9 cm durchgeführt werden. Dabei war ebenfalls zu ersehen, dass die gemessenen Daten am besten durch ein Modell mit Anisotropieparametern angepasst werden können (Tab. 28).

Tab. 28: Lognormal-Modell mit Anisotropie (Richtungseffekt: verallg. Mises-Modell) der Trockenmasse der Birkenblätter für den Bereich Birke in Fichte für die Baumart Birke

Modelle	Lognormal-Modell mit Anisotropie und Maximum-Likelihood-Funktion	
Parameter	$\beta = 2$ Verteilungsparameter $\mu = 1,90$ Verteilungsparameter $\sigma = 0,89$ Anisotropieparameter $k = 0,35$ Anisotropieparameter $u = 0,96$ Anisotropieparameter $v = -0,44$	
Ergebnisse	mittlere Ausbreitung [m] = 9,48 Gesamttrockenmasse [g] für eine Birke (BHD=37,9 cm) = 6253,3	
Strafterme	AIC: 640,98 BIC: 661,42	
Fehler	7,11	

Tab. 29 zeigt die Korrelation der gemessenen und modellierten Werte für diese zweite Variante.

Tab. 29: Korrelation für das Lognormal-Modell mit Anisotropie (Richtungseffekt: verallg. Mises-Modell) der Trockenmasse der Birkenblätter für den Bereich Birke in Fichte

		gemessen	modelliert	
gemessen	Korrelation nach Pearson	1,000	,851**	
	Signifikanz (2-seitig)		,000	
	N	137	137	
modelliert	Korrelation nach Pearson	,851**	1,000	
	Signifikanz (2-seitig)	,000		
	N	137	137	

\*\* . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Bei dem Modell aus den Tab. 28 und Tab. 29 liegt die Einzelbaumblatttrockenmasse einer Birke mit BHD 37,9 cm mit 6253,3 g unter der ersten Berechnung, in die nur Birken im Umkreis von 35 m eingeflossen sind. In die Berechnung mit 40 Birken sind wesentlich mehr Birken, die nicht mehr sehr vital sind, eingegangen als in die Berechnung mit 9 Birken. So kann diese Berechnung als repräsentativ für den gesamten Bestand gesehen werden. Das Modell aus Tab. 26 eignet sich dann eher für die vitaleren Birken dieser Untersuchungsfläche.



Die Verteilung der Birkenstreu im Bestand ist für die beiden Modellvarianten in den Abb. 50a und b dargestellt. Zwar zeigen die Abb. 50a und b, dass es sich nur um eine leichte Anisotropie handelt. Trotzdem ist klar zu erkennen, dass die Hauptwindrichtung SW wohl einen Einfluss auf die Blattverteilung im Bestand hat.

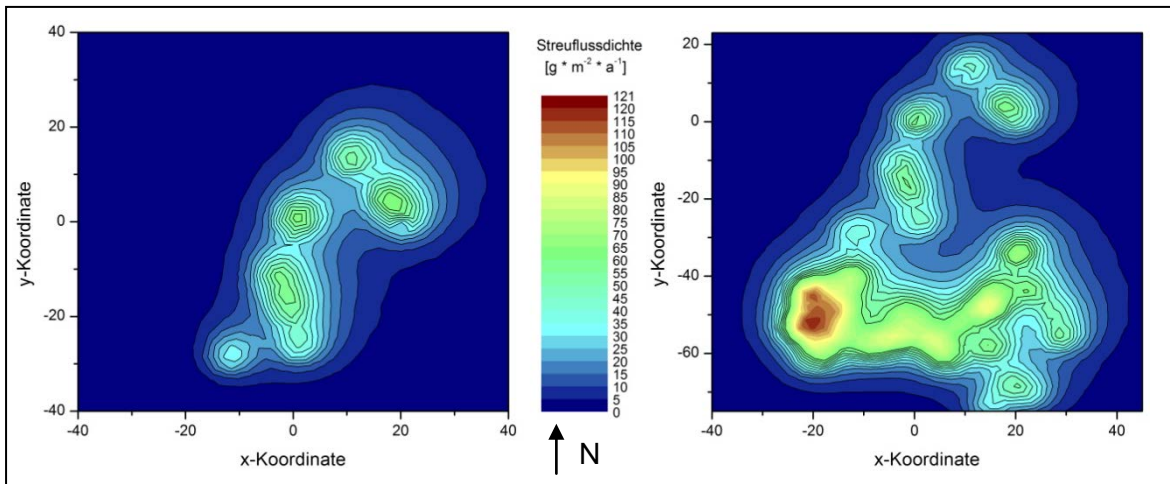


Abb. 50: Flussdichten der Birkenblätter-Trockenmassen aus der Modellierung a) mit 9 Birken und 65 Fallen und b) mit 40 Birken und 137 Fallen

In den folgenden Diagrammen (Abb. 51a und b) sind die Windrichtungsverhältnisse für den Zeitraum vom 13.09.2007 bis 18.12.2007 angegeben. In den Beschriftungen der Abbildungen sind auch jeweils die mittlere und maximale Windgeschwindigkeit aufgeführt. Für diesen Zeitraum wurden die Birkenlaubverteilungen (herbstlicher Blattfall) gemessen und modelliert. Die Windgeschwindigkeits- und Windrichtungssensoren standen auf einer Freifläche in 10 m Höhe über dem Erdboden. Allerdings lag die Messstation durch den vorgelegerten Bestand geschützt. Die Werte der Windgeschwindigkeit fallen deshalb geringer aus als bei einer reinen Freifläche. So können sie eher mit den Verhältnissen im Bestand verglichen werden, da auch dort "Windschutz" besteht.

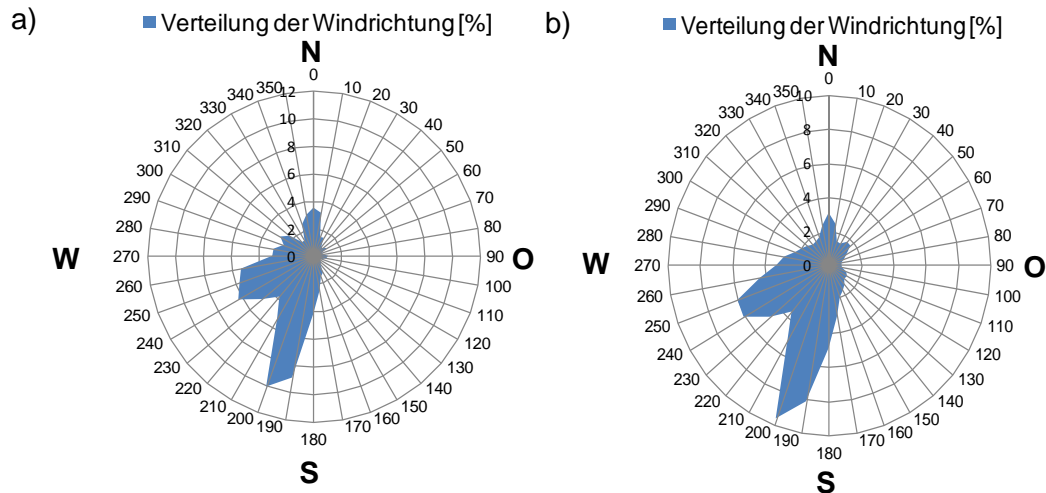


Abb. 51: Prozentuale Verteilung der Windrichtung gemessen auf der Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau (Staatsbetrieb Sachsenforst) a) für den Zeitraum 13.09.2007 bis 18.12.2007, mittlere Windgeschwindigkeit: 1,10 m/s, maximale Windgeschwindigkeit: 3,90 m/s, b) für den Zeitraum 01.09.2007 bis 30.09.2008, mittlere Windgeschwindigkeit: 0,93 m/s, maximale Windgeschwindigkeit: 3,20 m/s

Abb. 52b zeigt die Windrichtungsverteilung während des gesamten Untersuchungszeitraumes von 01.09.2007 bis 30.09.2008. Für diesen Zeitraum (also ein ganzes Jahr) wurde die Verteilung der Fichtennadelstreu gemessen und modelliert, da diese nicht dem herbstlichen Blattfall unterliegt.

Um die Repräsentanz der gemessenen und modellierten Ergebnisse für einen längeren Zeitraum als den Untersuchungszeitraum (01.09.2007 bis 30.09.2008) zu belegen, wurde ebenfalls die prozentuale Windrichtungsverteilung für über 12 Jahre untersucht. Veranschaulicht ist diese durch Abb. 52. Dabei ist eindeutig festzuhalten, dass die Hauptwindrichtung SW auch im Bestand immer wieder deutlich zu messen war und dadurch die Streufallverteilung beeinflusst wird. Die modellierten anisotropen Streuverteilungen in Richtung Nord-Ost sind demzufolge zweifelsfrei durch die Hauptwindrichtung aus Süd-West zu erklären.



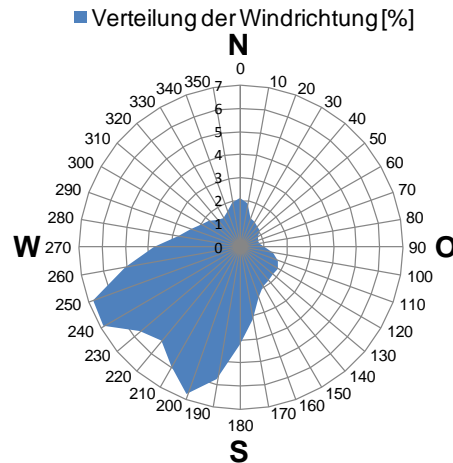


Abb. 52: Prozentuale Verteilung der Windrichtung für den Zeitraum 01.01.1997 bis 31.05.2009 gemessen auf der Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau (Staatsbetrieb Sachsenforst), mittlere Windgeschwindigkeit: 1,51 m/s, maximale Windgeschwindigkeit: 6,41 m/s

Da alle Diagramme der Windrichtungsverteilung eine klare Hauptwindrichtung aus Süd-West zeigen (auch zu der Zeit des Streufalls), die sich auch sehr deutlich in der Streuverteilungslage widerspiegelt, war es nicht notwendig, eine Wichtung der Streuverteilung mit der vorherrschenden Windrichtung zu Zeiten des Streufalls vorzunehmen (wie z. B. vorgeschlagen von BATSCHELET 1981).

Ergänzend zu den Befunden aus der Modellierung der Birkenblattverteilung im Bestand sei an dieser Stelle noch zu erwähnen, dass in einigen Streufängen ein großer Anteil der Streu nicht nur aus Birkenblättern sondern auch aus Birkensamenzäpfchen bestand. Diese traten aber vor allem sehr gehäuft in einzelnen Fällen auf. Außerdem waren z. B. auch Bestandteile wie Borke, Zweige und Fichtenzapfen zu finden. Deren Verteilungen sind aber schwieriger zu modellieren, weshalb die Daten für die vorliegende Arbeit nicht herangezogen wurden. Bei den ebenfalls in den Fällen aufgetretenen Knospenschuppen beider Baumarten wäre eine ähnliche Modellierung wie für die Birkenblätter denkbar. Diese weisen aber im Vergleich zu den Birkenblättern Massen mit geringerer Bedeutung für die Humusbildung auf.

### **Fazit:**

*In einer Entfernung von > 16 m vom Birkenstamm tritt kaum noch Birkenstreu auf. Nennenswerte Trockenflusssichten können nur in einem Radius von 10 m festgestellt werden. In diesem Bereich ist ein Effekt der Birkenstreu auf die Oberbodeneigenschaften zu erwarten. Es kann aber auch gezeigt werden, dass durch die vorherrschenden Windverhältnisse leichte Anisotropien der Laubverteilung nachweisbar sind. Die Gesamttrockenmasse einer relativ vitalen Birke mit rund 38 cm Brusthöhendurchmesser beträgt im Untersuchungsjahr rund 8 kg. Die Modellierung unter Hinzunahme weniger vitaler Birken reduziert die Gesamttrockenmasse auf 6,3 kg.*

### **4.4 Dynamik der Streuzersetzung**

Um zu erforschen, inwieweit einzelbaumweise eingemischte Birken die Streuzersetzung beeinflussen und die Beimischung der Birkenblätter zur Fichtenstreu deren Zersetzung verbessert, wurde ein Streuexperiment durchgeführt (vgl. Kap. 3.6). Grundlage für die Analysen (Methodik in Kap. 3.8) waren aus den Wiederholungen hergestellte Mischproben. Dadurch liegt immer nur ein Wert für jede Variante im jeweiligen Stratum zu einer bestimmten Zeit (Probenahmetermin) vor. Aus diesem Grund sind statistische Tests nicht möglich.

### **Trockenmassenverlust der Streu**

In den Diagrammen der Abb. 53 sind die Ergebnisse des Experimentes als Trockenmassenverluste der Birkenblätter und Fichtennadeln dargestellt. Dazu wurden die 5 Wiederholungen jeweils gemittelt.

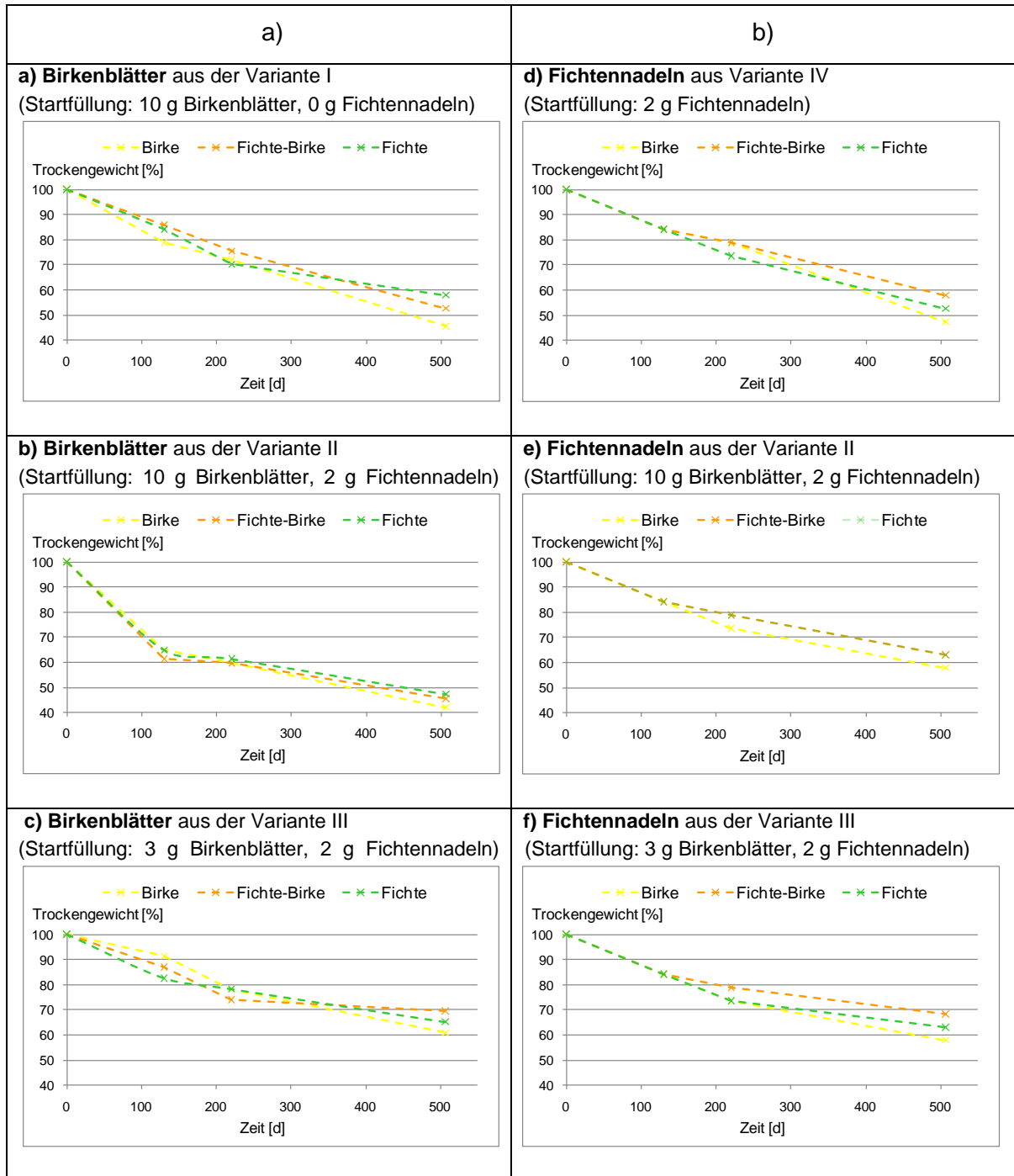


Abb. 53: Trockenmassenverlust [%] a) der Birkenblätter und b) der Fichtennadeln aus den Litter-Bags in den drei Straten

Aus den Diagrammen der Abb. 53 ist deutlich zu erkennen, dass der Massenverlust der Birkenblätter in allen Straten am größten bei der Mischung der Birkenblätter mit Fichtennadeln im Verhältnis von 5 zu 1 (Abb. 53b) war. Bei den Fichtennadeln zeigten insgesamt diejenigen, die aus den reinen Nadel-Litter-Bags stammten, die höchsten Trockenmassenverluste. Allerdings wirkte sich die Lage unter der Birkenkrone positiv aus (Abb. 53d).

Bei allen Varianten schnitt diese Lage sowohl bei der Zersetzung der Fichtennadeln als auch der Birkenblätter immer am besten ab. Der Übergangsbereich Fichte-Birke zeigt einmal höhere und einmal niedrigere Abbauraten als der Bereich unter reiner Fichte.

Nach 506 Tagen, also rund einem Jahr und fünf Monaten, haben die Birkenblätter im Durchschnitt über alle Varianten und Straten 5 % mehr Trockenmasse verloren als die Fichtennadeln. Bei den Birkenblättern waren es im Mittel rund 46 % und bei den Nadeln rund 41 % Trockenmasseverlust. Oftmals ähneln sich aber die Abbauraten. Heraus sticht dabei die Variante II, in der größere Unterschiede zwischen den beiden Streuarten hervortraten. Unter der Birkenkrone und dem reinen Fichtenbereich war die Trockenmasse der Birkenblätter um rund 16 % und im Fichten-Birken-Bereich um rund 17 % mehr reduziert als die der Nadeln (Abb. 53b und e).

Bei den beiden reinen Litter-Bag-Varianten (Abb. 53a und d) führte die Lage unter der Birkenkrone bei den Streuarten jeweils zu einer besseren Zersetzung und zu einer ca. 2 % höheren Birkenstreuersetzung im Vergleich zu den Nadeln. Die Lage im Übergangsbereich hatte dabei eine 5 % bessere Zersetzung der Birkenblätter im Vergleich mit den Fichtennadeln zur Folge. Im reinen Fichtenbereich wiesen allerdings die Fichtennadeln eine um rund 5 % bessere Zersetzung als die Birkenblätter auf.

In der Variante III war durchgehend eine bessere Zersetzungsrate der Fichtenstreu im Vergleich zur Birkenstreu festzustellen. Diese war unter reiner Birke um rund 3 %, im Übergangsbereich um 1 % und unter Fichte um 2 % höher.

#### **C/N-Verhältnis der Streu**

Abb. 54 zeigt C/N-Verhältnisse der Birkenblätter und Fichtennadeln aus den Litter-Bags für die drei Straten. Grundlage für die Analysen (Methodik in Kap. 3.8) waren aus den Wiederholungen hergestellte Mischproben. Bezüglich der C/N-Verhältnisse hebt sich die Lage unter der Birkenkrone nicht so stark positiv ab (Abb. 54). In allen drei Straten liegen die Werte oftmals sehr eng beieinander. Allerdings wird für die Fichtennadeln aus der Variante II (also der Mischung Birke und Fichte im Verhältnis von 5 zu 1) unter reiner Fichte ein engeres C/N-Verhältnis als in den anderen Varianten (Abb. 54e) sichtbar. Es sind insgesamt keine eindeutigen Unterschiede in den Trends zwischen dem Fichten-Birken-Stratum und dem Bereich unter reiner Fichte zu beobachten.

Für die C/N-Verhältnisse der Birkenblätter kann aber festgehalten werden, dass sie in allen Varianten, allen Straten und zu allen Terminen deutlich enger sind als die der Fichtennadeln. Außerdem ist der Abfall der C/N-Kurven bei den Birkenblättern steiler als bei den Fichtennadeln.

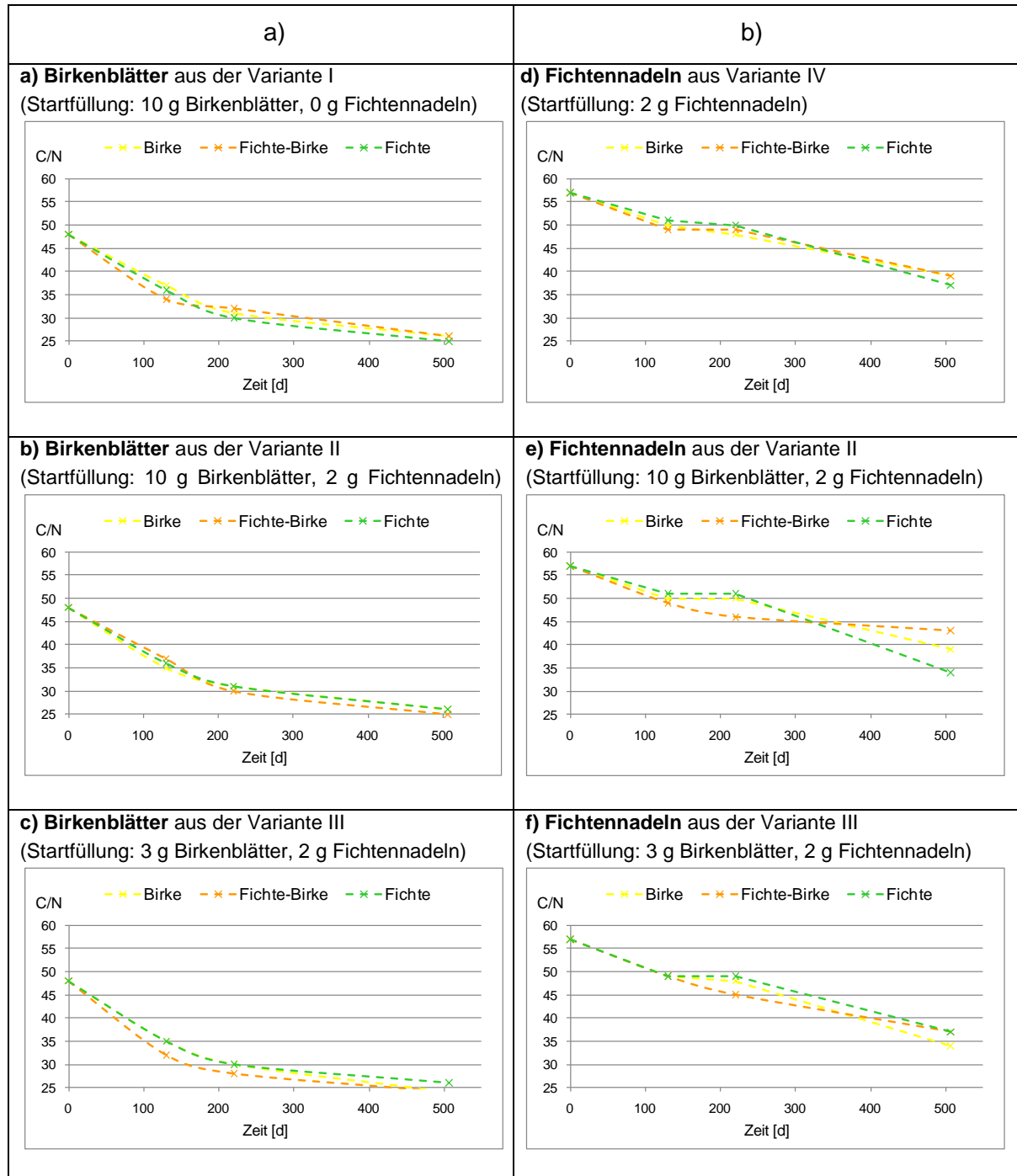


Abb. 54: C/N-Verhältnisse der Birkenblätter und der Fichtennadeln aus den Litter-Bags in den drei Straten

Sowohl bei den Trockenmassen als auch bei den C/N-Verhältnissen wird deutlich, dass im ersten Winter bezogen auf das erste Jahr ein relativ starker Abbau stattfand. Diese Zersetzung war optisch nach der ersten Entnahme nicht erkennbar, da sowohl die Blätter als auch die Nadeln noch sehr gut erhalten waren.

Die Variante V, die als Nullvariante gedacht war und nur eine leere Filtertüte enthielt, wird hier nicht dargestellt. Der Grund dafür ist, dass sich die Filtertüten in dieser Variante sehr schlecht oder kaum zersetzten und nicht mit dem eigentlichen Experiment vergleichbar waren. Dadurch kann Variante V nicht für die Ergebnisinterpretation herangezogen werden. Bei den anderen Varianten, die Filtertüten enthielten, wurden die Filtertütenreste vor der Trockenmassenbestimmung von den Blättern und Nadeln getrennt und beeinflussen dadurch nicht die Ergebnisse. Die Zersetzung der Streu war noch nicht so weit fortgeschritten, dass es zu einer Vermischung von Streu und Filtertüten kam.

#### **Temperatur am Waldboden**

Die Temperaturmessungen der Logger am Waldboden zeigen für alle drei Straten gleiche Verhältnisse in den Wintermonaten (Abb. 55 bis Abb. 57). Gerade in der Zeit, als eine geschlossene Schneedecke existierte, traten in allen drei Bereichen sehr geringe Temperaturschwankungen auf. Betrachtet man die Vegetationsperiode im Jahr 2008, ist auffällig, dass gerade bei hohen Temperaturen Unterschiede zwischen den drei Bereichen erkennbar sind. Die höchsten Temperaturen finden sich dabei unter reiner Fichte. Dieser Bereich war geprägt von einem hohen Deckungsgrad an Moosen und nur wenig krautigen Pflanzen. Es handelte sich um einen sehr lockeren Bestandesbereich, der aber noch nicht so hell war, dass es viele krautige Pflanzen gab, aber auch nicht so dunkel, dass am Boden die Nadelstreu dominierte. So wurde der Temperatur-Logger nicht von der Bodenvegetation überschirmt. Die niedrigsten Temperaturen traten im Bereich Fichte-Birke, also dem Übergangsbereich, auf. Dieser war durch eine relativ üppige Krautschicht geprägt. Eine Zwischenstellung nimmt der Bereich unter der Birkenkrone ein. Hier gab es im Vergleich mit dem Übergangsbereich weniger krautige Bodenvegetation, jedoch mehr als unter der reinen Fichte. Bei den Tiefsttemperaturen waren keine auffälligen Unterschiede zwischen den drei Straten festzustellen.

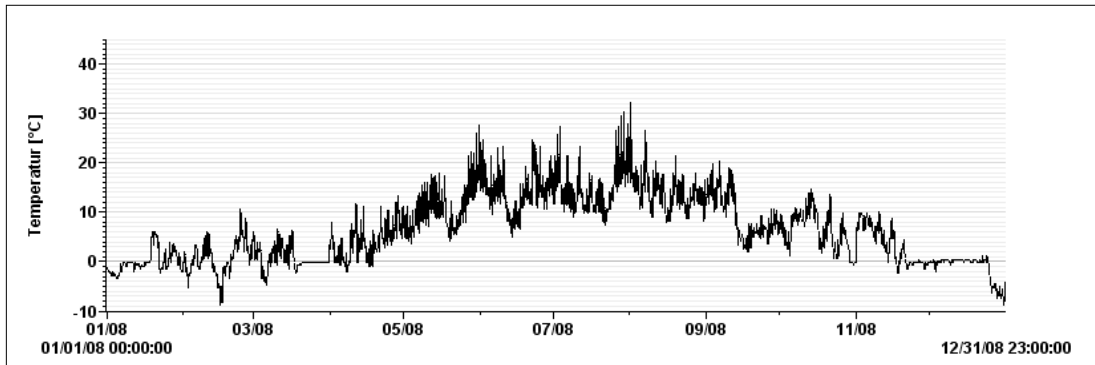


Abb. 55: Verlauf der mittleren Stundentemperatur des Loggers unter der Birkenkrone für das Jahr 2008, Max. 32,3°C und Min. -8,9°C

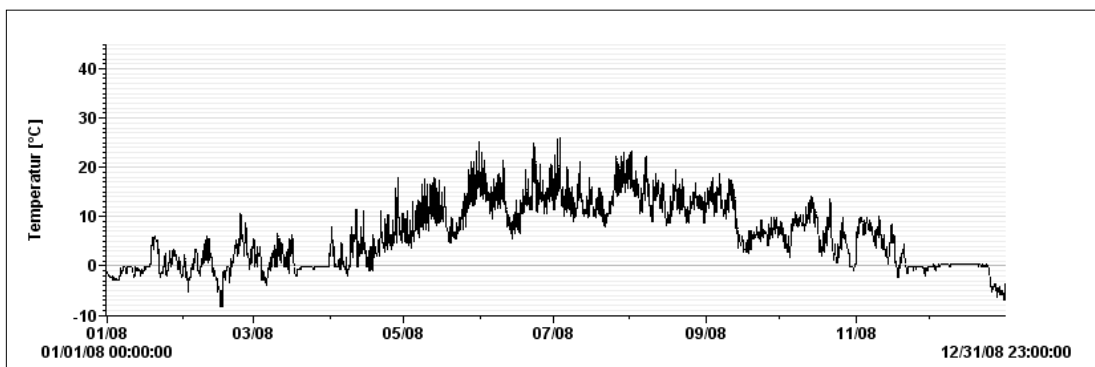


Abb. 56: Verlauf der mittleren Stundentemperatur des Loggers unter Fichte-Birke für das Jahr 2008, Max. 29,1°C und Min. -8,4°C

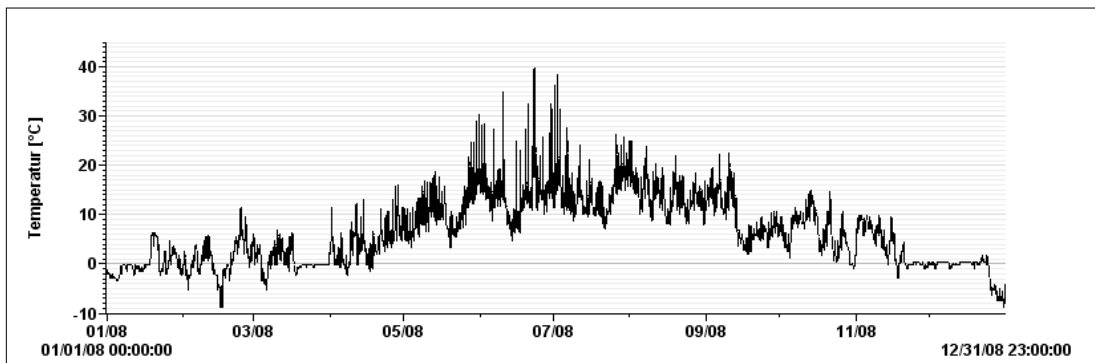


Abb. 57: Verlauf der mittleren Stundentemperatur des Loggers unter reiner Fichte für das Jahr 2008, Max. 40,1°C und Min. -8,9°C

**Fazit:**

*Im Streuabbau-Experiment ist der Massenverlust der Birkenblätter in allen drei Straten bei der Mischung der Birkenblätter mit Fichtennadeln im Verhältnis 5:1 am größten. Bei den Fichtennadeln zeigen sich die höchsten Trockenmassenverluste in den reinen Nadel-Litter-Bags. Bei allen Varianten weisen die Litter-Bags unter der Birkenkrone die beste Zersetzung der Birkenblätter und der Fichtennadeln auf.*

*Die C/N-Verhältnisse als Indikator der Streuqualität lassen keine eindeutigen positiven Effekte der Birkenkrone erkennen. Sie sind aber bei den Birkenblättern in allen Varianten, in allen Straten und zu allen Terminen deutlich enger als die der Fichtennadeln. Desweiteren ist der Abfall der C/N-Kurven bei den Birkenblättern steiler als bei den Fichtennadeln.*

**4.5 Morphologie des Humuskörpers**

Sowohl für die Fichten-Birken-Fläche als auch für die reine Fichtenfläche wurden die Mächtigkeiten der Auflage (Of-Lage, Oh-Lage und Gesamtmächtigkeit) sowie die Humusform entlang von Transekten bestimmt (vgl. Kap. 3.7).

**Mächtigkeit der Auflage**

Abb. 58a veranschaulicht die Verteilung der Mächtigkeit des Of-Horizontes entlang des Transektes Fichte-Birke. Die Pfeile symbolisieren die Stammfüße der Baumindividuen. Zu beobachten ist, dass die Mächtigkeit entlang des Transektes variiert.

Im Of nimmt sie von den Birkenstämmen ausgehend hin zu den Nachbarbäumen zu. Der Oh-Horizont des Fichten-Birken-Transektes weist weniger kontinuierliche räumliche Muster der Mächtigkeit auf als der Of-Horizont (Abb. 58b). Die niedrigsten Werte finden sich unter der Birke.



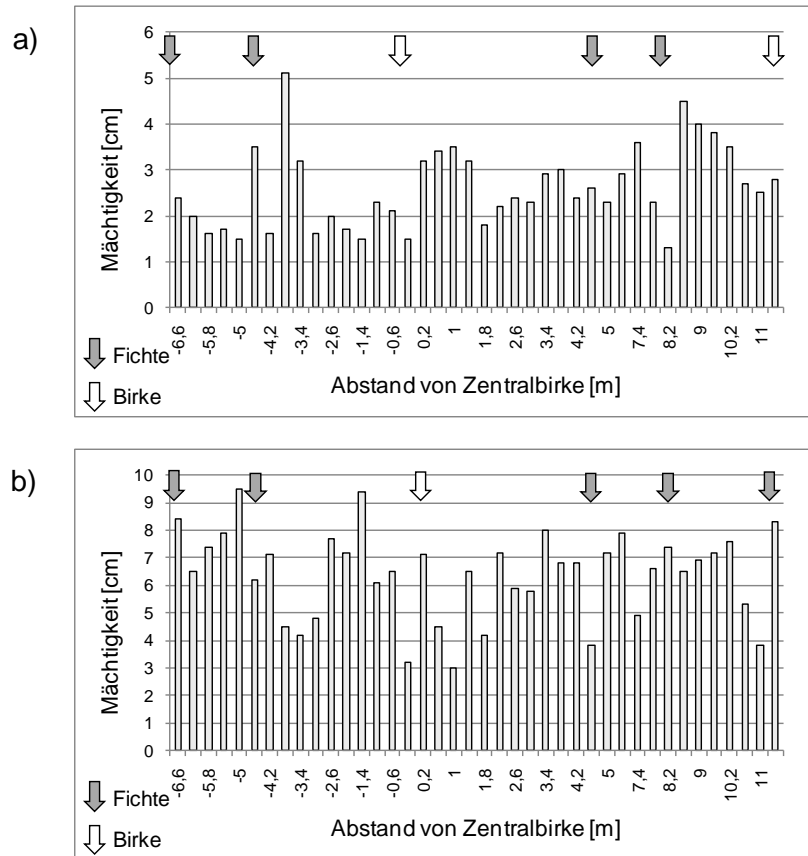


Abb. 58: Mächtigkeit a) des Of-Horizontes und b) des Oh-Horizontes jeweils für Fichte-Birke (positive Distanzen = Nordwest = Transekt 102; negative Distanzen = Südost = Transekt 104)

Abb. 59a stellt die Verteilung der Of-Mächtigkeit entlang des Transektes Fichte dar. Hier ist, wie auf dem Fichten-Birken-Transekt, festzustellen, dass die Mächtigkeit räumlich sehr heterogen ist. Mit zunehmender Entfernung von der Zentralfichte nimmt sie ab, steigt aber in der Nähe des Nachbarbaumes wieder an. Hohe Werte finden sich in der Nähe des Stammfußes.

Für die Oh-Mächtigkeit entlang des Transektes Fichte (Abb. 59b) sind die Übergänge in südöstlicher Richtung eher allmählich, während in südwestlicher Richtung häufig kleinräumlich abrupte Übergänge zu beobachten sind. Die Werte fallen mit zunehmendem Abstand von der Zentralfichte. Mit abnehmender Entfernung zum südöstlichen Nachbarn, etwa ab 2 m Entfernung zum Stammfuß, werden die Werte wieder größer.

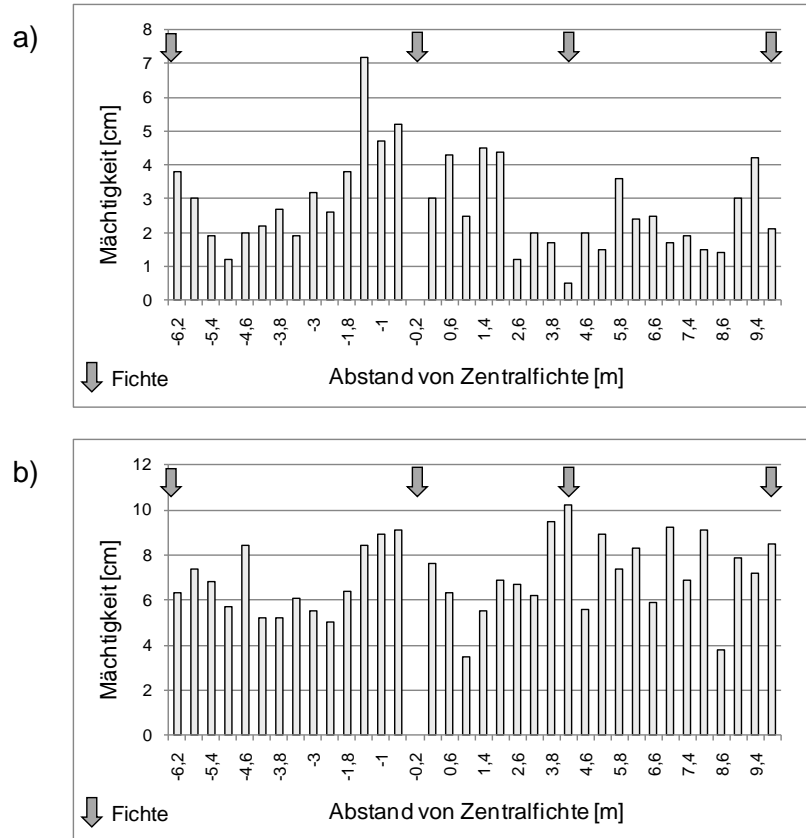


Abb. 59: Mächtigkeit a) des Of-Horizontes und b) des Oh-Horizontes jeweils für Fichte (positive Distanzen = West = Transekt 201; negative Distanzen = Südost = Transekt 204)

Unter reiner Fichte treten die höchsten Gesamtmächtigkeiten auf (Abb. 60a und b). Allerdings weichen die beiden Bereiche Fichte-Birke und reine Fichte nur geringfügig voneinander ab. Die räumlichen Muster sind weniger deutlich als im einzeln betrachteten Of-Horizont.

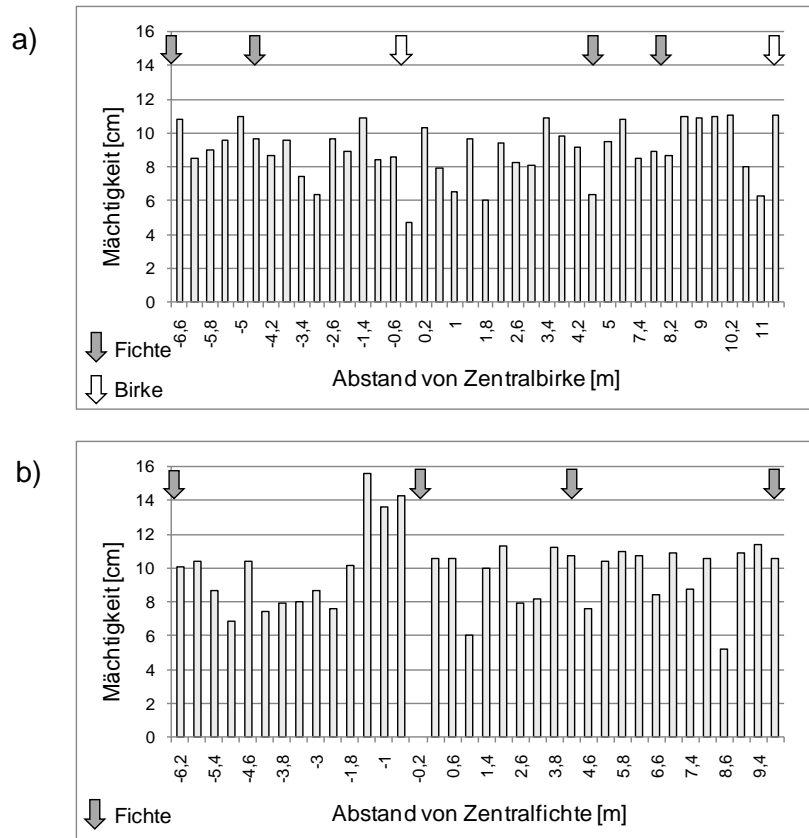


Abb. 60: Gesamtmächtigkeit a) für Fichte-Birke (positive Distanzen = Nordwest = Transekt 102; negative Distanzen = Südost = Transekt 104) und b) für reine Fichte (positive Distanzen = West = Transekt 201; negative Distanzen = Südost = Transekt 204)

Für die Of-Lage sind nachstehend Semivariogramme der Mächtigkeit für den Fichten-Birken-Bereich (Abb. 61) und den Fichtenbereich (Abb. 62) aufgeführt. Die Gesamtvarianz des Datensatzes unter Fichte-Birke beträgt dabei 0,8 (Abb. 61). Das Semivariogramm lässt erkennen, dass sich vor allem die Punkte in 3,6 bis 4,4 m Entfernung gleichen. Der zu beobachtende Locheffekt verweist darauf, dass es entlang des Transektes nach 4 m bzw. 8 bis 9 m zu ähnlichen Verhältnissen der Of-Mächtigkeit kommt (vgl. DALE 2006, S. 287).

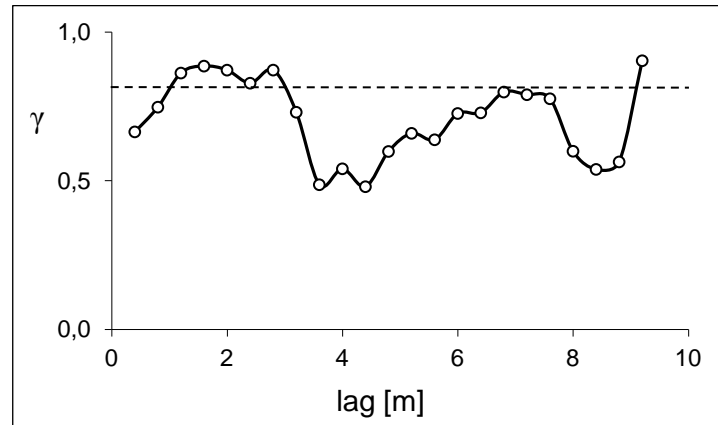


Abb. 61: Semivariogramm der Of-Mächtigkeit entlang des Fichten-Birken-Transektes (n. TISCHER 2009)

Im reinen Fichten-Bereich liegt die Gesamtvarianz bei 1,9 (Abb. 62). Auf diesem Transekt sind benachbarte Punkte ähnlicher als Punkte, die weiter auseinander liegen. Nach einer gewissen Entfernung von 3,2 m bzw. 6,4 m scheinen sich die Verhältnisse zu ähneln.

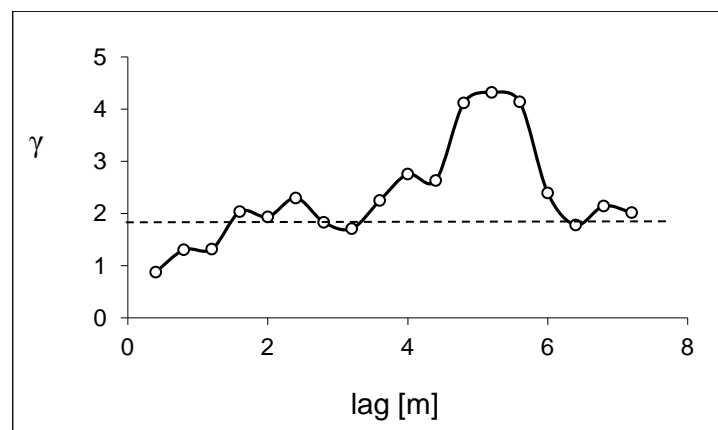


Abb. 62: Semivariogramm der Of-Mächtigkeit entlang des Fichten-Transektes (n. TISCHER 2009)

Werden die einzelnen gemessenen Werte der Horizontmächtigkeit den drei Straten zugeordnet, ergeben sich die folgenden Unterschiede (Tab. 30).

Tab. 30: Statistische Kennwerte für die Mächtigkeiten in den drei Straten

statistische Kennwerte	Birke	Fichte-Birke	Fichte
Mächtigkeit Of-Lage			
Min	0,2	0,9	0,5
Max	3,7	8,0	8,0
Median	2,3	2,5	2,8
Mittelwert	2,4	2,8	3,1
Asymp. Signifikanz H-Test	0,012		
Asymp. Signifikanz Median-Test	0,289		
Mächtigkeit Oh-Lage			
Min	3,0	3,0	2,7
Max	9,4	9,8	10,2
Median	5,9	6,6	6,6
Mittelwert	5,8	6,5	6,6
Asymp. Signifikanz H-Test	0,000		
Asymp. Signifikanz Median-Test	0,000		
Gesamtmächtigkeit (Of+Oh)			
Min	4,7	4,9	3,8
Max	11,1	11,2	15,6
Median	8,2	9,6	10,4
Mittelwert	8,1	9,3	9,8
Asymp. Signifikanz H-Test	0,000		
Asymp. Signifikanz Median-Test	0,000		

**Tab. 30** zeigt u. a. auch die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests (H-Test) sowie des Median-Tests. Mit Hilfe des  $\chi^2$ -Ansatzes wurde geprüft, zwischen welchen Straten die signifikanten Unterschiede bestehen. In der Of-Lage ist für die Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ein Unterschied zwischen den Straten Birke und Fichte nachzuweisen. Bei  $\alpha = 0,10$  besteht auch zwischen dem Fichten- und dem Fichten-Birken-Stratum ein signifikanter Unterschied. Für die Oh-Lage und die Gesamtmächtigkeit sind höchst signifikante Abweichungen des Birken-Stratums vom Fichten-Birken- und vom Fichten-Stratum festzustellen.

### Humusform

Mit Blick auf die Humusform sind keine deutlichen Unterschiede zwischen den Baumartenstraten festzustellen. Es tritt nur die Humusform rothumusartiger Moder auf. Dabei sind aber Unterschiede zwischen den drei Straten bei der Verteilung der Varianten des

rohhumusartigen Moders festzustellen (Abb. 63). Im Fichten-Stratum überwiegt der feinhumusreiche rohhumusartige Moder mit über 70 %. Dagegen verhält es sich im Fichten-Birken-Stratum und im Birken-Stratum genau anders herum. In allen drei Straten tritt der feinhumusreiche rohhumusartige Moder vor allem in der Nähe von Stämmen auf, ist aber in geringeren Anteilen auch an stammfernen Punkten zu finden.

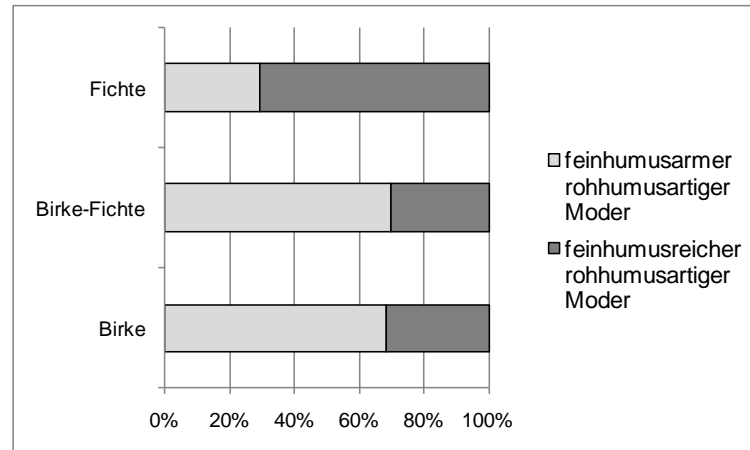


Abb. 63: Verteilung der Humusformen innerhalb der drei Straten

#### **Fazit:**

*Die Mächtigkeit des Of-Horizontes weist sowohl in der Mischsituation als auch in der reinen Fichtenfläche deutlichere räumliche Muster auf als im Oh-Horizont. Im Of sind dadurch klare vom Einzelbaum abhängige Muster zu erkennen. Die höchsten Mächtigkeiten treten in Stammnähe auf. Die größten Gesamtmächtigkeiten existieren unter reiner Fichte. Zwischen den Straten sind für die Of-, die Oh- und die Gesamtmächtigkeiten signifikante Unterschiede nachweisbar. Dabei hebt sich in der Of-Lage vor allem das Birken-Stratum vom Fichten-Stratum ab. In der Oh-Lage und dadurch auch bei der Gesamtauflage sind zusätzlich die Mächtigkeiten des Fichten-Birken-Stratums signifikant verschieden zum Birken-Stratum.*

*Als Humusform tritt der rohhumusartige Moder auf. Im Fichtenstratum überwiegt der feinhumusreiche rohhumusartige Moder, im Fichten-Birken-Stratum und im Birken-Stratum dagegen der feinhumusarme rohhumusartige Moder.*

### **4.6 Chemische und mikrobiologische Oberbodeneigenschaften**

Zur Charakterisierung der weiteren Oberbodeneigenschaften wurden entlang von Transekten Proben aus den Horizonten Of, Oh und A entnommen und analysiert (vgl. Kap. 3.8). Nachstehend werden beispielhaft verschiedene Bodenaktivitätsparameter sowie bodenchemische Kennwerte nach Transekten und nach Straten vorgestellt.

#### **4.6.1 Vergleich ausgewählter Bodenkennwerte nach Transekten**

Im Folgenden wird eine Auswahl von Ergebnissen für das erste Transekt dargestellt. Dieser wurde extra ausgewählt, weil dort der Einfluss weiterer Birken durch Birkenstreu durch die Ergebnisse des Streuexperimentes vollständig ausgeschlossen werden konnte (siehe Abb. 23). Abb. 64 (Of-Lage), Abb. 65 (Oh-Lage) und Abb. 66 (A-Horizont) lassen Ergebnisse dieses Transektes, auf dem die einzelne Birke im Koordinatenursprung steht, erkennen. An den beiden letzten Punkten dieses Transektes kann durch die Befunde der Streumessungen (Kap. 4.3) ausgesagt werden, dass dort kein Birkenlaub mehr zu finden war. Diese Punkte waren also nur durch Fichten beeinflusst.

Durch Abb. 64 bis Abb. 66 wird deutlich, dass vor allem im Of-Horizont eine zunehmende Versauerung des Oberbodens von der Birke hin zur Fichte festzustellen ist. Die pH-Werte des Of-Horizontes liegen unter der Birkenkrone etwa eine Einheit höher als im Bereich der reinen Fichte (Abb. 64). Sie sind den pH-Stufen stark sauer (pH-Wert [KCl] = 4,0) bis mittel sauer (pH-Wert [KCl] = 5,3) gemäß AK STO (2003) zuzuordnen. Im Oh-Horizont reichen die pH-Wertstufen von sehr stark sauer (pH-Wert [KCl] = 3,8) bis mittel sauer (pH-Wert [KCl] = 6). Die pH-Werte (KCl) des A-Horizontes schwanken nur zwischen 3,1 und 3,6 und sind somit sehr stark sauer. Der A-Horizont zeigt sich entlang des Transektes nahezu unverändert bei vergleichsweise niedrigerem pH-Wert. Der Gesamtkohlenstoffgehalt ( $C_{\text{ges}}$ ) weist besonders im Of- und A-Horizont leicht steigende Tendenzen mit zunehmendem Einfluss der Fichte auf. Ähnliches ist für den  $C_{\text{ges}}$ -Vorrat zu beobachten, allerdings präsentiert sich im Oh-Horizont eine Abnahme.

Zur Beschreibung der biologischen Aktivität werden nachstehend die mikrobielle Biomasse mit verschiedenen Verhältnissen und die Basalatmung sowie der metabolische Quotient herangezogen. Die mikrobielle Biomasse wird als der Anteil organischer Substanz im Boden, der aus lebenden Mikroorganismen besteht, definiert (ALEF 1991). Wie aus den

Abb. 64 bis Abb. 66 ersichtlich ist, weisen die mikrobiellen Anteile von Kohlenstoff und Stickstoff ( $C_{\text{mik}}$  und  $N_{\text{mik}}$ ) eine Reduzierung im Of- und Oh-Horizont auf, währenddessen sie im A-Horizont zur Fichte hin zunehmen. Das  $C_{\text{org}}/N$ -Verhältnis der Bodenproben, ein wichtiges Merkmal für die Umsetzungsbedingungen, steigt in der Of-Lage an, im A-Horizont jedoch sinkt es. Beim Verhältnis von  $C_{\text{mik}}/N_{\text{mik}}$  lassen sich keine klaren Tendenzen erkennen. Hingegen kann für das Verhältnis von  $C_{\text{mik}}$  zu  $C_{\text{org}}$ , das den Anteil des mikrobiell gebundenen Kohlenstoffs am organischen Kohlenstoff angibt, folgende Aussage getroffen werden: In den Lagen Of und Oh sind die Werte direkt unter Fichte niedriger. Der Anteil des mikrobiellen Kohlenstoffs im Verhältnis zum organischen Kohlenstoff ist also unter der Birke und im Übergangsbereich höher als unter Fichte. Demnach können die Mikroorganismen unter der Fichte den Kohlenstoff des Bodens weniger zum Aufbau und zur Erhaltung ihrer Biomasse nutzen als unter Birke und in der Mischungssituation. Die Abbaubedingungen unter Birkeneinfluss sind also besser.

Beim prozentualen Anteil des mikrobiellen Stickstoffs am Gesamtstickstoff ( $N_{\text{mik}}/N_{\text{ges}}$ ) sind in der Of- und Oh-Lage die höchsten Werte unter der Birke festzustellen. Die Werte der Basalatmung lassen in der Of-Lage keine Zu- oder Abnahme entlang des Transektes erkennen. In der Oh-Lage zeigen sich die höchsten Werte unter der Birke, im A-Horizont dagegen unter der Fichte. Beim metabolischen Quotienten, der die  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates pro Einheit mikrobieller Biomasse  $[(\text{mg CO}_2\text{-C/h})/\text{g } C_{\text{mik}}]$  angibt, treten in den Horizonten Of und A die höchsten Werte unter der Fichte auf. Je höher der metabolische Quotient ist, desto mehr Substrat wird zu  $\text{CO}_2$  veratmet und desto kleiner ist der Substratanteil, der in die mikrobielle Biomasse eingebaut wird (AG VBB 2009). Für den Oh-Horizont ist eher eine umgekehrte Tendenz zu erkennen, die aber nicht so deutlich ist.



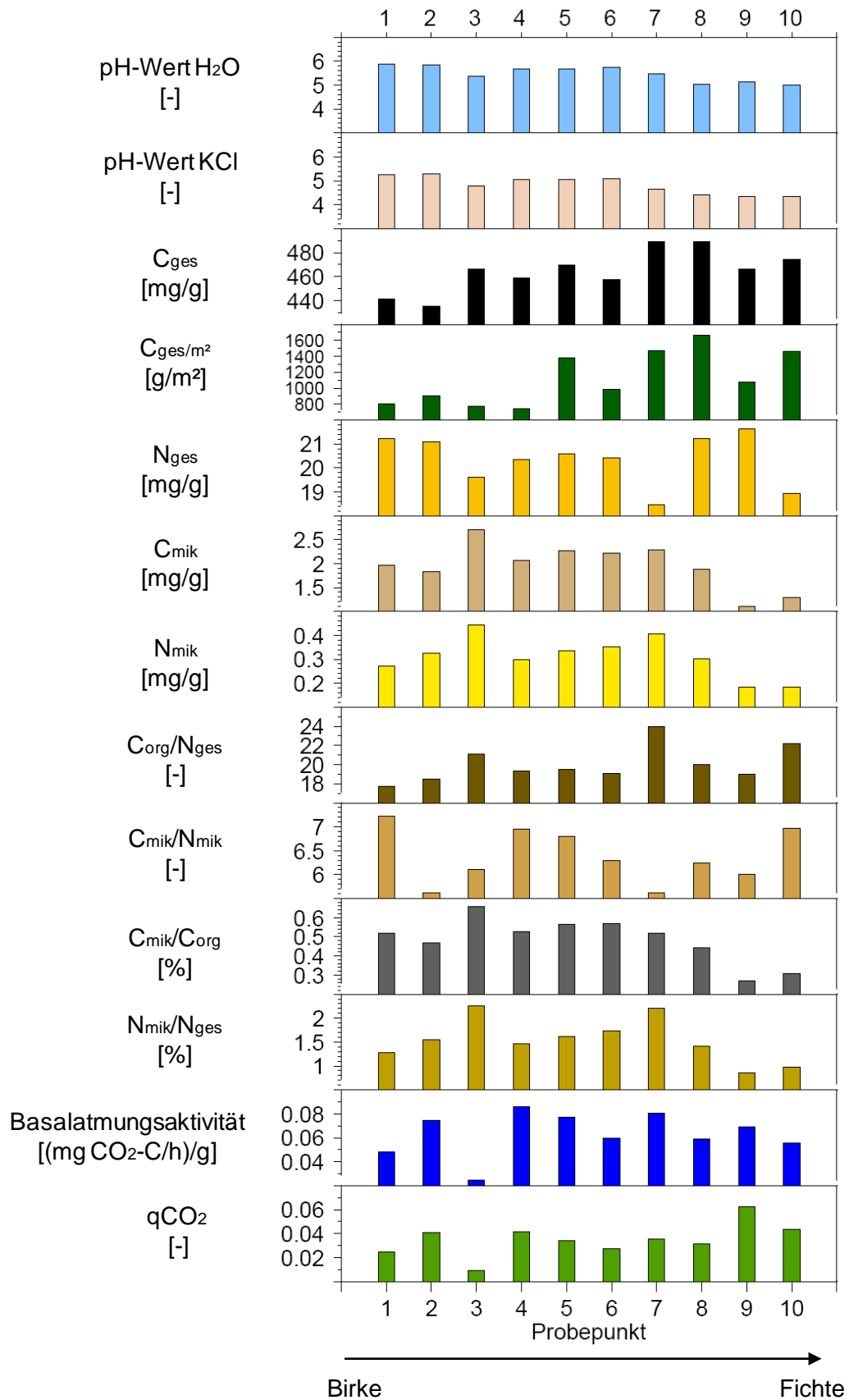


Abb. 64: Darstellung unterschiedlicher bodenchemischer und bodenphysikalischer Eigenschaften des Of-Horizontes für ein Transekt, in Anlehnung an SCHÖBER (2009)

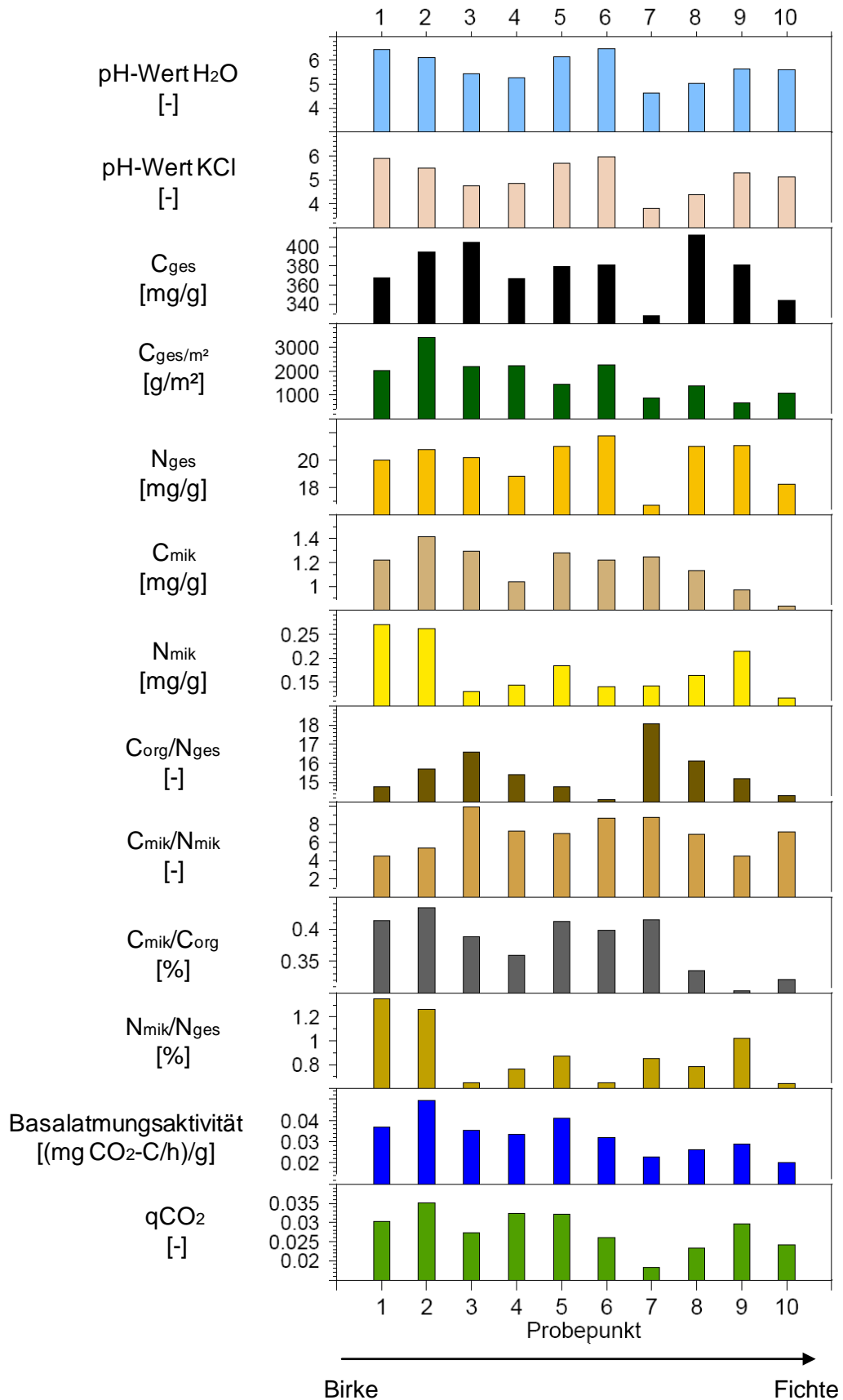


Abb. 65: Darstellung unterschiedlicher bodenchemischer und bodenphysikalischer Eigenschaften des Oh-Horizontes für ein Transekt, in Anlehnung an SCHÖBER (2009)

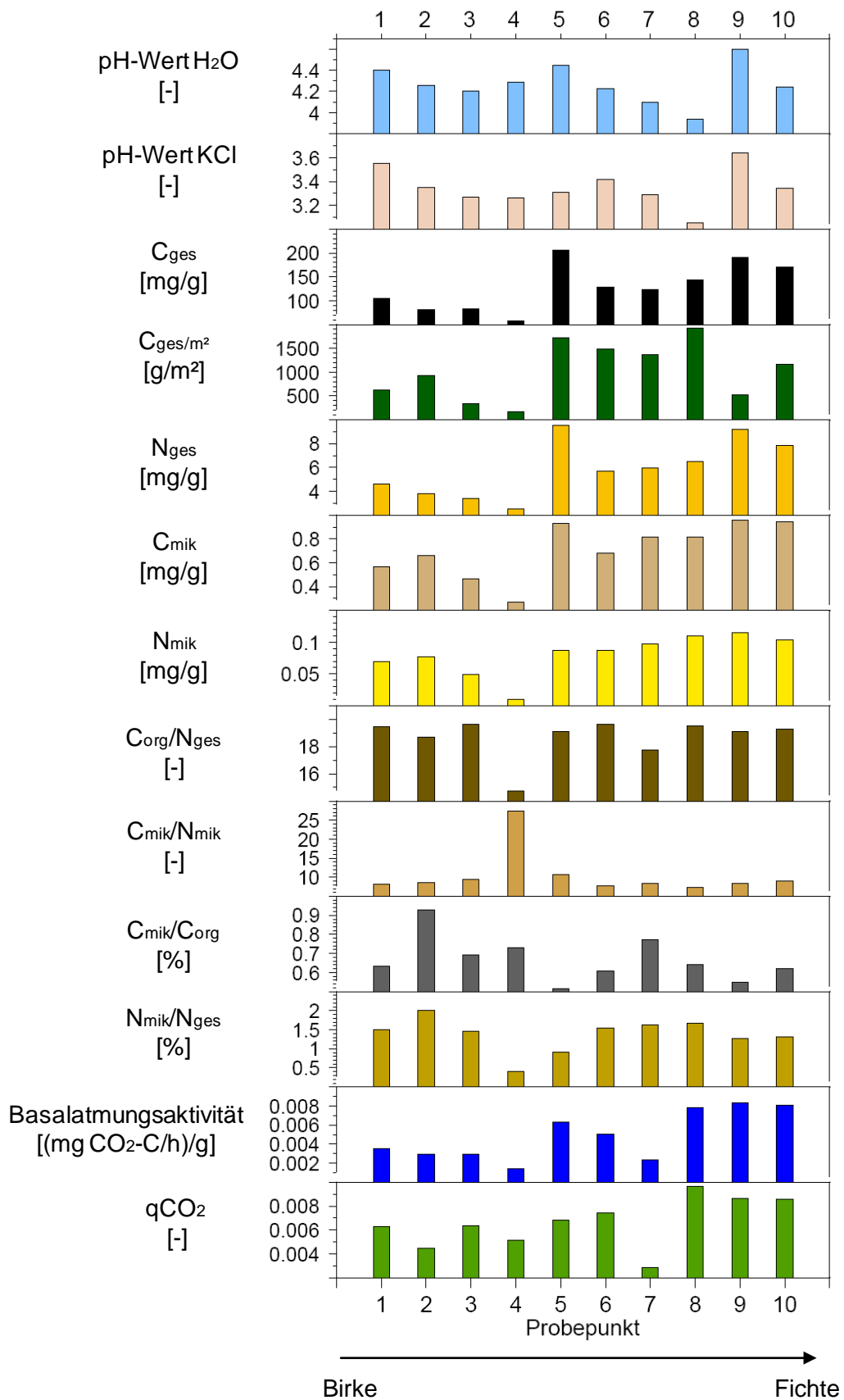


Abb. 66: Darstellung unterschiedlicher bodenchemischer und bodenphysikalischer Eigenschaften des A-Horizontes für ein Transekt, in Anlehnung an SCHÖBER (2009)

#### 4.6.2 Vergleich der Bodenkennwerte nach Straten

##### Acidität

Abb. 67a zeigt Unterschiede zwischen den drei Straten bezüglich der pH-Werte in KCl. Für den Of-Horizont konnten sehr signifikante Unterschiede ( $\alpha = 0,05$ ) zwischen den Straten Birke und Fichte festgestellt werden. Im Oh- und A-Horizont gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Straten. Für den pH-Wert in  $H_2O$  (Abb. 67b) zeigen sich die gleichen Trends, allerdings liegen die Werte erwartungsgemäß höher als die in KCl.

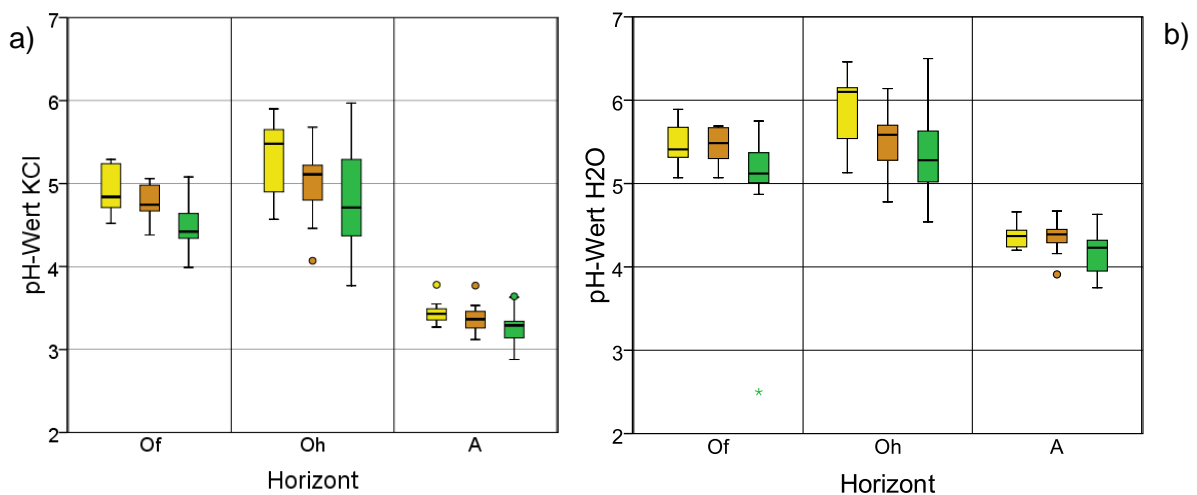


Abb. 67: Box-Whisker-Plots der pH-Werte a) in KCl und b) in  $H_2O$   
(gelb: Birken-Stratum, orange: Fichten-Birken-Stratum, grün: Fichten-Stratum)

##### C<sub>org</sub>/N-Verhältnis

Bei der Betrachtung des C<sub>org</sub>/N-Verhältnisses (Abb. 68) fällt auf, dass die Verhältnisse im Oh-Horizont deutlich enger sind, als die des Of- oder A-Horizontes. Im Of-Horizont führte der Kruskal-Wallis-Test sowohl für  $\alpha = 0,05$  als auch für  $\alpha = 0,10$  zu keinem relevanten Unterschied zwischen den drei Straten. Für die Horizonte Oh und A konnten sowohl durch den Kruskal-Wallis-Test als auch durch den Mediantest höchst signifikante Ergebnisse für  $\alpha = 0,05$  festgestellt werden. Diese existieren nach dem  $\chi^2$ -Ansatz zwischen allen drei Straten. Für den Oh-Horizont ist dabei folgende Reihenfolge festzustellen: Fichte-Birke < Birke < Fichte und für den A-Horizont: Birke < Fichte-Birke < Fichte.

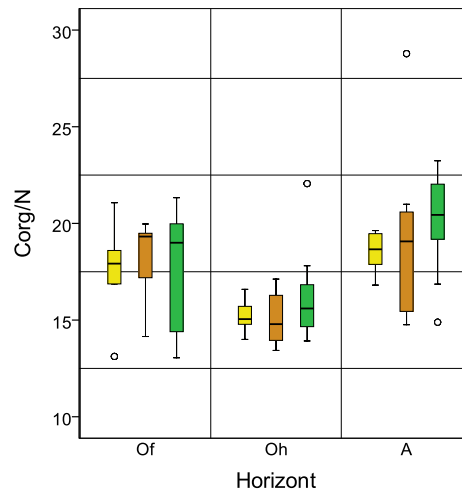


Abb. 68: Box-Whisker-Plots des  $C_{org}/N$ -Verhältnisses  
(gelb: Birken-Stratum, orange: Fichten-Birken-Stratum, grün: Fichten-Stratum)

### Kohlenstoff

In Abb. 69a sind die Gesamtgehalte an Kohlenstoff für die drei Straten horizontabhängig aufgeführt. Dabei liegt für die Of-Lage ein sehr signifikanter Befund vor, der aber nicht durch den Mediantest bestätigt werden kann. Für die Oh-Lage führen beide Testverfahren zu höchst signifikanten Ergebnissen. Diese existieren nach dem  $\chi^2$ -Ansatz zwischen allen drei Straten, wobei die höchsten Werte im Birken-Stratum und die niedrigsten im Fichten-Birken-Stratum nachzuweisen sind. Auch im A-Horizont sind alle Ergebnisse signifikant. Die Reihenfolge der Straten ist in diesem Horizont wie folgt: Birke < Fichte-Birke < Fichte. Die höchsten C-Gesamtgehalte weist der Of-Horizont auf.

Hinsichtlich der Vorräte des Gesamtkohlenstoffs (Abb. 69b) ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den drei Straten im Of-Horizont ( $\alpha = 0,05$ ). Die Reihenfolge beträgt dabei: Birke < Fichte-Birke < Fichte. Die Horizonte Oh und A zeigen dagegen keine signifikanten Differenzen zwischen den Straten. Die höchsten Vorräte finden sich im Oh-Horizont.

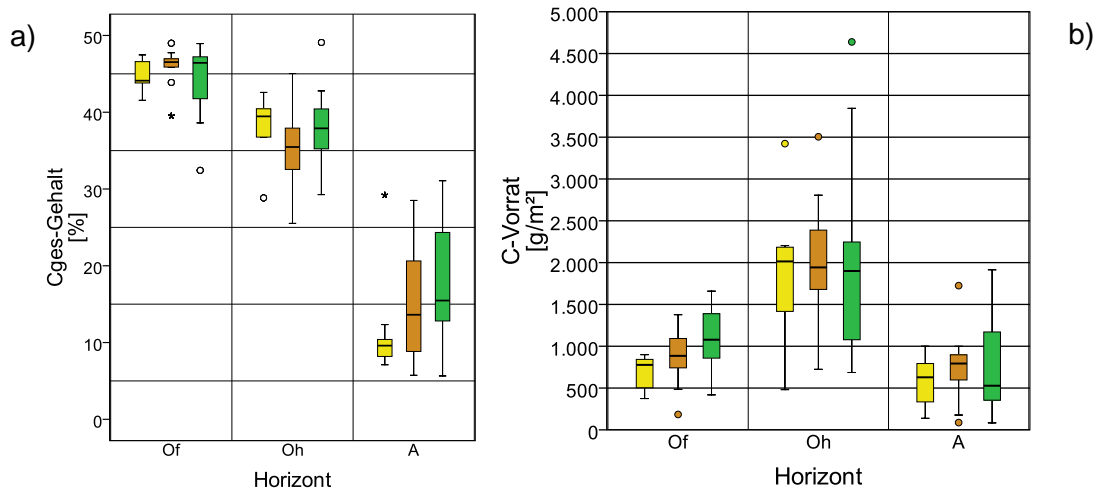


Abb. 69: Box-Whisker-Plots a) der C-Gesamtgehalte sowie b) der C-Gesamtvorrate (gelb: Birken-Stratum, orange: Fichten-Birken-Stratum, grün: Fichten-Stratum)

Wie im Kap. 2.4 beschrieben, wurde die Untersuchungsfläche das letzte Mal 2001 gekalkt. Aus diesem Grund sind die Box-Whisker-Plots der Gehalte des carbonatischen Kohlenstoffs im Oberboden für jedes Stratum in Abb. 70a dargestellt. Dabei führten sowohl der Median- als auch der Kruskal-Wallis-Test im Of- und A-Horizont zu höchst signifikanten Unterschieden. Diese Differenzen bestehen nach dem  $\chi^2$ -Ansatz zwischen allen drei Straten, wobei die niedrigsten  $C_{\text{carbonat}}$ -Gehalte im Birken-Stratum und die höchsten im Übergangsbereich nachzuweisen sind. Der Oh-Horizont zeigt sowohl für  $\alpha = 0,05$  als auch für  $\alpha = 0,10$  keine kennzeichnenden Abweichungen zwischen den drei Straten.

Der aus der Differenz zwischen dem Gesamtkohlenstoff- und dem carbonatischen Kohlenstoffgehalt ermittelte organische Kohlenstoffgehalt deutet für beide Signifikanzschranken keine herausragenden Befunde in der Of-Lage an (Abb. 70b). Für die Oh-Lage veranschaulicht der Kruskal-Wallis-Test höchst signifikante Befunde, die aber durch den Mediantest nicht bestätigt werden konnten. Im A-Horizont stellten sich bei beiden Tests höchst signifikante Unterschiede heraus. Nach dem  $\chi^2$ -Ansatz liegen diese zwischen allen drei Straten vor. Die Reihenfolge der Straten kann wie folgt angegeben werden: Birke < Fichte-Birke < Fichte. Hierbei muss aber betont werden, dass die  $C_{\text{org}}$ -Gehalte für den A-Horizont teilweise sehr hoch sind und taxonomisch eigentlich nicht mehr dem A-Horizont sondern eher der Oh-Lage zuzuordnen sind. Die erhöhten Gehalte können zum einem daher rühren, dass Oh-Material in die Proben gelangt ist. Bei gekalkten Böden ist aufgrund der erhöhten Aktivität der Bodenfauna meistens eine reine Abgrenzung zwischen Oh und A sehr schwierig. Allerdings waren die dafür typischen unscharfen Grenzen zwischen Auflage und A-Horizont im Untersuchungsbestand optisch

nicht sichtbar. Der A-Horizont war oft podsolig und die Oh-Lage ließ sich vom A-Horizont händisch gut trennen. Weiterhin muss darauf hingewiesen werden, dass für die erhöhten  $C_{org}$ -Gehalte mitunter folgender Fakt mitverantwortlich sein könnte: Eigentlich werden bei herkömmlichen bodenkundlichen Beprobungen stammnahe Probepunkte vermieden. Aufgrund des Untersuchungsansatzes der vorliegenden Arbeit, bei dem auch in der Nähe der Stammfüße beprobt wurde, sind teilweise höhere Anteile an Feinwurzeln sowie des Edaphons an diesen Probepunkten zu erwarten. Diese sind nicht komplett durch das den Analysen vorgeschaltete Sieben der Bodenproben zu entfernen.

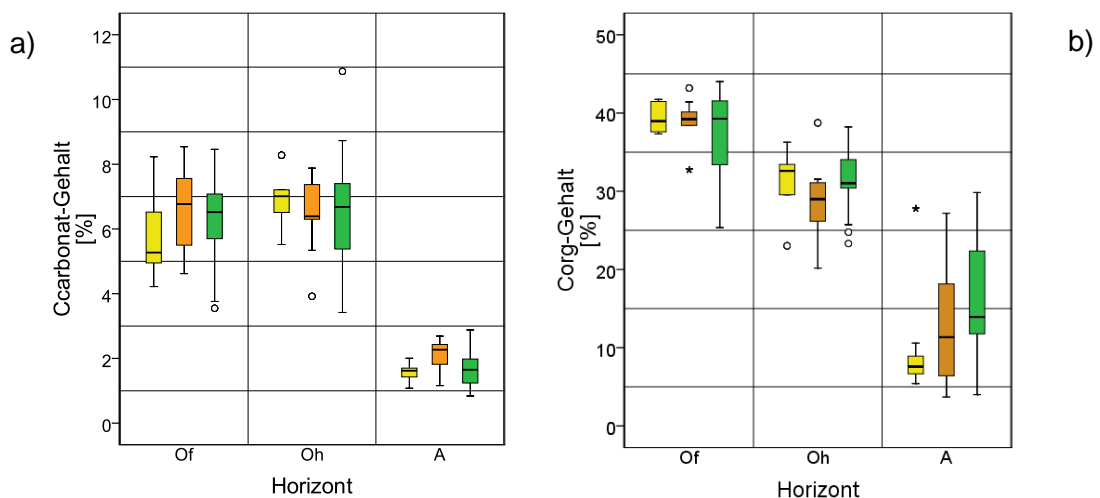


Abb. 70: Box-Whisker-Plots a) des carbonatischen Kohlenstoffgehaltes und b) des organischen Kohlenstoffgehaltes (gelb: Birken-Stratum, orange: Fichten-Birken-Stratum, grün: Fichten-Stratum)<sup>2</sup>

## Stickstoff

Für die  $N_{ges}$ -Gehalte (Abb. 71a) existieren im Of-Horizont kennzeichnende Unterschiede. Die  $\chi^2$ -Approximation zeigt, dass diese Signifikanz zwischen den Straten Fichte-Birke und Fichte zu finden ist. Durch die Mediane lässt sich folgende Reihenfolge erkennen: Fichte < Birke < Fichte-Birke. Im Oh-Horizont konnte keine Signifikanz nachgewiesen werden. Der A-Horizont weist nur bei  $\alpha = 0,10$  relevante Unterschiede auf, die nach dem  $\chi^2$ -Test zwischen den Straten Birke und Fichte bestehen. Aus der Abb. 71a ist aber erkennbar, dass die Mediane im A-Horizont vom Birken- zum Fichten-Stratum kontinuierlich ansteigen.

<sup>2</sup> Zu beachten ist hierbei, dass die beiden Diagramme zur besseren Veranschaulichung der Unterschiede zwischen den Straten und Horizonten nicht gleich skaliert sind.

Der Vorrat des Gesamtstickstoffs ( $N_{\text{ges}}/\text{m}^2$ ) ist in Abb. 71b dargestellt. Er stellt ähnliche Differenzen zwischen den Straten wie der  $C_{\text{ges}}/\text{m}^2$  heraus. Ein Unterschied mit  $\alpha = 0,10$  ist im Of-Horizont zwischen den Straten Birke und Fichte durch die  $\chi^2$ -Approximation nachzuweisen. Im Oh- und A-Horizont sind jeweils keine Unterschiede zwischen den Grundgesamtheiten erkennbar. Der  $N_{\text{ges}}$ -Vorrat ist wie der  $C_{\text{ges}}$ -Vorrat im Oh höher als im Of- und A-Horizont.

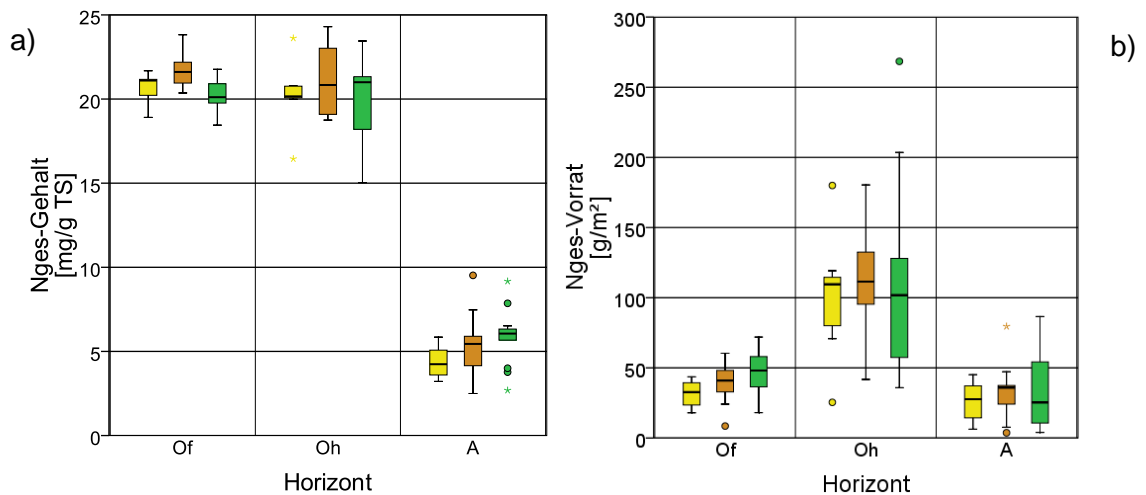


Abb. 71: Box-Whisker-Plots a) der N-Gesamtgehalte sowie b) der N-Gesamtvorräte (gelb: Birken-Stratum, orange: Fichten-Birken-Stratum, grün: Fichten-Stratum)



### Mikrobielle Aktivität

Des Weiteren erzielten die Analysen der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalte (Abb. 72a) sowie der  $C_{\text{mik}}$ -Vorräte (Abb. 72b) keine signifikanten Unterschiede.

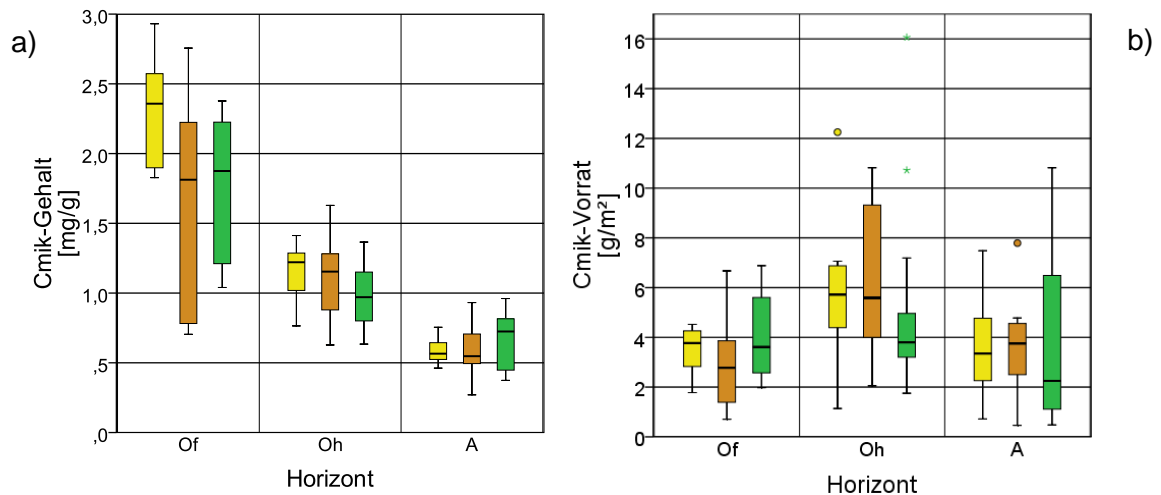


Abb. 72: Box-Whisker-Plots a) des mikrobiellen Kohlenstoffgehaltes sowie b) des mikrobiellen Kohlenstoffvorrates; (gelb: Birken-Stratum, orange: Fichten-Birken-Stratum, grün: Fichten-Stratum)

Bei den  $N_{\text{mik}}$ -Gehalten treten in der Humusaufgabe die geringsten Werte in den Bereichen auf, in denen nur die Fichte einen Einfluss hat (Abb. 73a). In der Of-Lage sind die  $N_{\text{mik}}$ -Gehalte nur für  $\alpha = 0,10$  signifikant. Durch den  $\chi^2$ -Ansatz zeigten sich aber keine Unterschiede zwischen den einzelnen Straten. Signifikante Befunde für  $\alpha = 0,05$  konnten hingegen in der Oh-Lage beobachtet werden. Hierbei ist der Verlauf:

Birke > Fichte-Birke > Fichte. Für den A-Horizont fanden sich keine deutlichen Differenzen zwischen den Straten. Auch bei den  $N_{\text{mik}}$ -Vorräten ließen sich keine Differenzen zwischen den drei Klassen nachweisen (Abb. 73b).

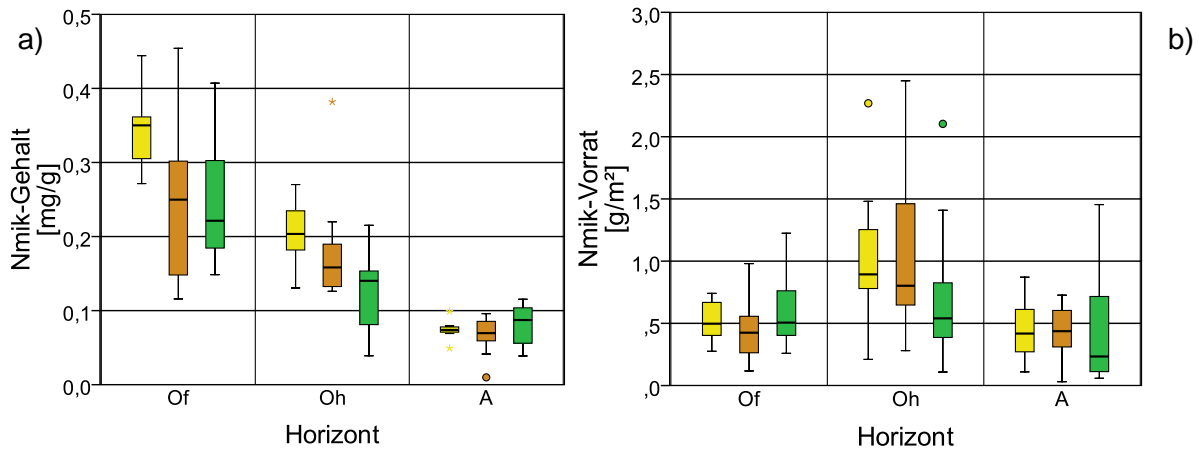


Abb. 73: Box-Whisker-Plots a) des mikrobiellen N-Gehaltes sowie b) des mikrobiellen N-Vorrates; (gelb: Birken-Stratum, orange: Fichten-Birken-Stratum, grün: Fichten-Stratum)

In Abb. 74a bis c folgen die  $C_{\text{mik}}/N_{\text{mik}}$ -Verhältnisse, die für die Horizonte Of und A in den einzelnen Straten unwesentlich differieren. Für den Oh-Horizont kann für  $\alpha = 0,10$  ein signifikanter Befund beim Vergleich des Birken und des Fichten-Birken-Stratums ermittelt werden.

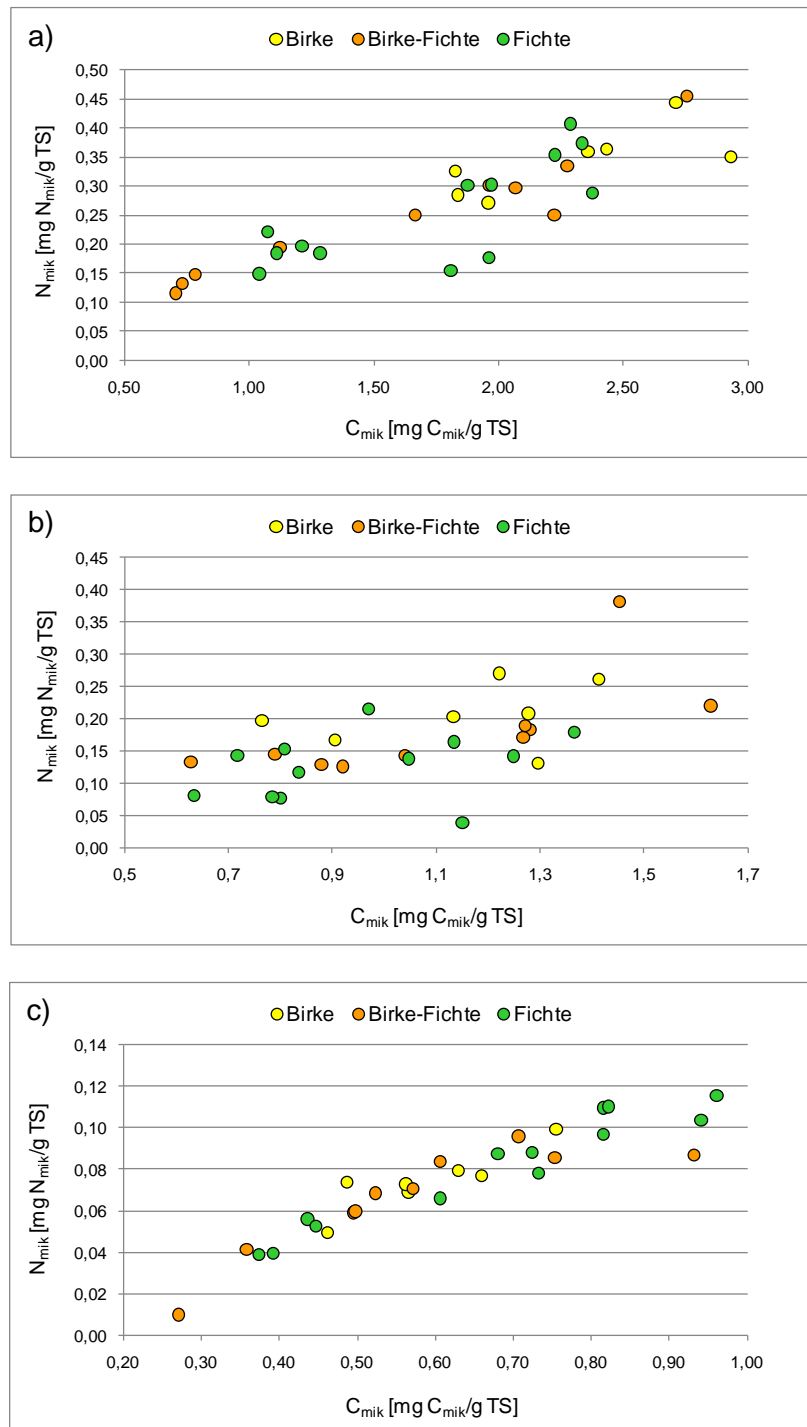


Abb. 74: Mikrobieller Biomasse-C im Verhältnis zum mikrobiellen Biomasse-N für a) den Of-Horizont, b) den Oh-Horizont und c) den A-Horizont

In Abb. 75a ist die Basalatmung als Maß für die mikrobielle Aktivität dargestellt. Sie nimmt vom Of- zum A-Horizont hin kontinuierlich ab. Im Of-Horizont existiert kein bedeutender Unterschied zwischen den Straten. Dagegen besteht im Oh-Horizont nach dem H-Test eine hoch signifikante Differenz, die durch den Median-Test signifikant bestätigt wurde.

Der  $\chi^2$ -Ansatz zeigt zwischen den Straten Birke und Fichte hoch signifikante und zwischen den Straten Fichte-Birke und Fichte signifikante Unterschiede an. Im A-Horizont gab es keine nachweisbaren signifikanten Unterschiede.

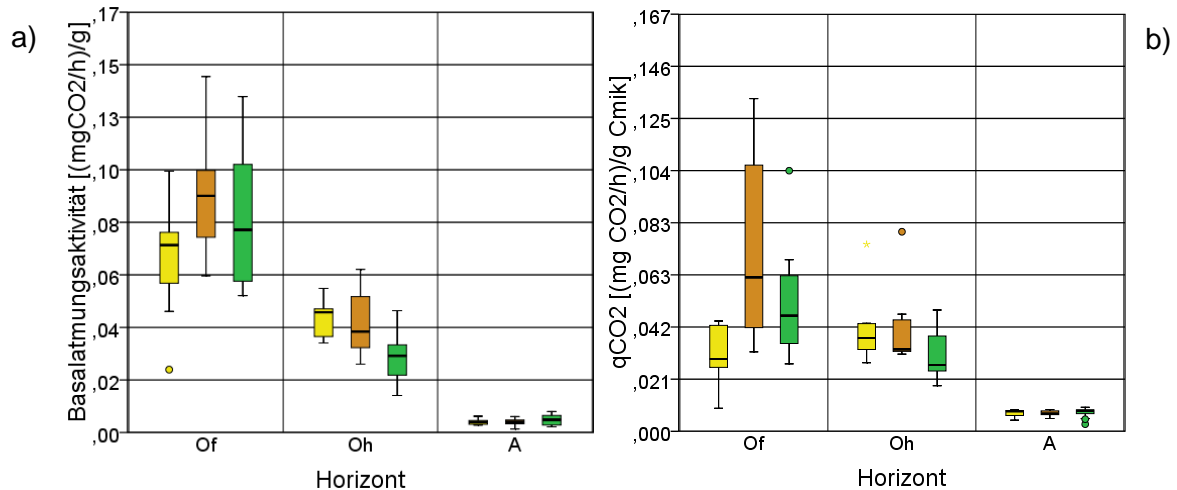


Abb. 75: a) Basalatemungsaktivität der drei Straten in den drei Horizonten, b) Metabolischer Quotient (qCO<sub>2</sub>) der drei Straten in den drei Horizonten

Beim metabolischen Quotienten (qCO<sub>2</sub>), der die CO<sub>2</sub>-Freisetzungsrates pro Einheit mikrobieller Biomasse [(mg CO<sub>2</sub>-C/h)/g C<sub>mik</sub>] angibt, sind relevante Unterschiede im Of- und Oh-Horizont nachweisbar (Abb. 75b). Im Of-Horizont bestehen sie zwischen den Straten Birke und Fichte-Birke ( $\alpha = 0,10$ ). Der metabolische Quotient ist im Of im Fichten-Birken-Stratum am höchsten und weist dort auch die größte Streuung auf. Im Fichten-Stratum liegt er niedriger und ist im Birken-Stratum am niedrigsten. Bei  $\alpha = 0,10$  lässt sich durch die  $\chi^2$ -Approximation im Oh-Horizont ein Unterschied zwischen den Straten Fichte-Birke und Fichte nachweisen. Hier lautet die Reihenfolge der Mediane Birke < Fichte-Birke < Fichte. Für den A-Horizont konnte keine signifikante Differenz ermittelt werden.

Zusammenfassend sind die Befunde aus der Stratenauswertung der chemischen und mikrobiologischen Oberbodeneigenschaften in Tabellenform (Tab. 31) aufgeführt.

Tab. 31: Darstellung signifikanter Befunde aus dem Vergleich der Straten für einzelne erhobene Parameter im Oberboden nach Horizonten; nicht signifikante Befunde sind mit n. s. gekennzeichnet

Parameter	Horizont		
	Of	Oh	A
<b>pH-Wert</b>	Birke > Fichte (rund eine pH-Einheit Unterschied)	n. s.	n. s.
<b>C<sub>org</sub>/N</b>	n. s.	Fichte-Birke < Birke < Fichte	Birke < Fichte- Birke < Fichte
<b>C<sub>ges</sub>-Gehalt</b>	n. s.	Fichte-Birke < Fichte < Birke	Birke < Fichte- Birke < Fichte
<b>C<sub>ges</sub>-Vorrat</b>	Birke < Fichte-Birke < Fichte	n. s.	n. s.
<b>C<sub>carbonat</sub>-Gehalt</b>	Birke < Fichte < Fichte- Birke	n. s.	Birke < Fichte < Fichte-Birke
<b>C<sub>org</sub>-Gehalt</b>	n. s.	n. s.	Birke < Fichte- Birke < Fichte
<b>N<sub>ges</sub>-Gehalte</b>	Fichte < Fichte-Birke	n. s.	Birke < Fichte.
<b>N<sub>ges</sub>-Vorrat</b>	Birke < Fichte	n. s.	n. s.
<b>C<sub>mik</sub>-Gehalt</b>	n. s.	n. s.	n. s.
<b>C<sub>mik</sub>-Vorrat</b>	n. s.	n. s.	n. s.
<b>N<sub>mik</sub>-Gehalt</b>	n. s.	Birke > Fichte- Birke > Fichte	n. s.
<b>N<sub>mik</sub>-Vorrat</b>	n. s.	n. s.	n. s.
<b>C<sub>mik</sub>/N<sub>mik</sub></b>	n. s.	Birke > Birke- Fichte	n. s.
<b>Basalatmungsaktivität</b>	n. s.	Fichte < Birke und Fichte < Birke- Fichte	n. s.
<b>metabolischer Quotient</b>	Birke < Fichte-Birke und Birke < Fichte	Fichte < Fichte- Birke	n. s.

### Multivariate Ordination der Elementgehalte, des pH-Wertes sowie der C- und N-Gehalte

Im Folgenden ist die PCA ausgewählter Bodenparameter aufgeführt (Abb. 76). Darin eingeflossen sind die KW-extrahierbaren Gehalte der Elemente Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, und Zn sowie die pH-Werte (KCl) und die C- und N-Gehalte. Ziel dieser Ordination ist es, die wichtigsten Bodenparameter herauszufiltern und als Gradienten abzubilden. Abb. 76a demonstriert, dass der Kohlenstoff und das Kalium entlang der ersten Achse verlaufen, die 99,3 % der Varianz erklärt (Tab. 32). Aber auch Calcium und Magnesium spannen jeweils einen langen Vektor entlang der zweiten Achse auf. Das Birken-Stratum zeigt dabei die höchsten Calcium und Magnesium-Gehalte. Bei der PCA der standardisierten Werte ist aber keine stratenspezifische Anordnung der Punkte erkennbar Abb. 76b.

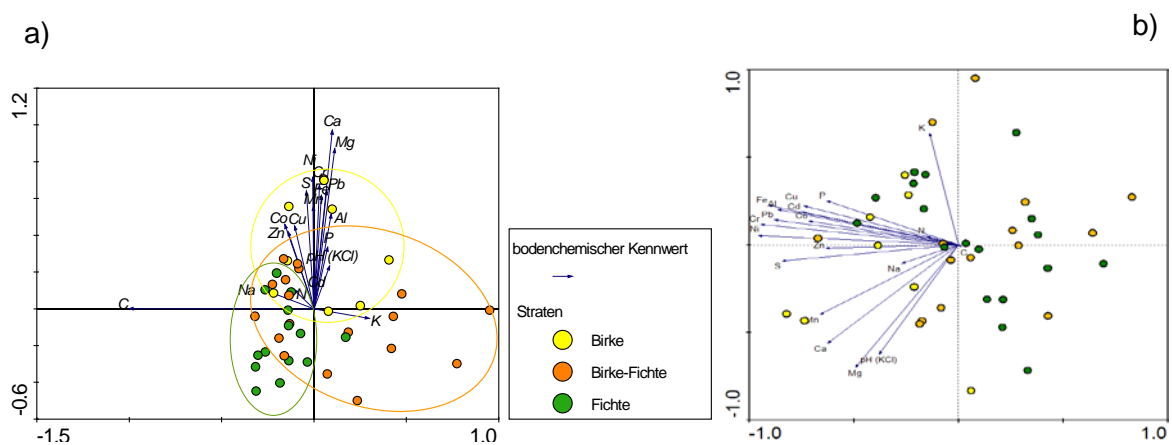


Abb. 76: PCA-Ordinationsdiagramm für die Elementgehalte aus dem Königswasseraufschluss, die pH-Messung (KCl) sowie die Gehalte aus den C- und N-Analysen für den Of-Horizont der drei Straten mit a) absoluten Werten sowie b) standardisierten Werten

Tab. 32: Datentabelle für das PCA-Ordinationsdiagramm für die absoluten Elementgehalte aus dem Königswasseraufschluss, die pH-Messung (KCl) sowie die Gehalte aus den C- und N-Analysen für den Of-Horizont der drei Straten

Achsen	1	2	3	4
kumulative prozentuale Varianz der Daten	99,3	99,7	99,9	100,0

Um den Einfluss des Kohlenstoffs zu isolieren und die Bedeutung der anderen Elemente genauer zu betrachten, wurde zusätzlich eine PCA ohne Kohlenstoff erstellt (Abb. 77). Auch hierbei ist erkennbar, dass das Fichten-Birken-Stratum die größte Streuung aufweist. Die erste Achse, auf der Calcium und Magnesium die längsten Vektoren aufspan-

nen, erklärt 59 % der Varianz (Tab. 33). Wird noch die zweite Achse hinzugezogen, sind schon 80,7 % der Varianz erklärt. Auf dieser Achse spannt Stickstoff einen sehr langen Vektor. Das Birken-Stratum zeigt wieder die höchsten Calcium und Magnesium-Gehalte. Mit der multivariaten Statistik konnte die Stratenbildung für die absoluten Werte bestätigt werden.

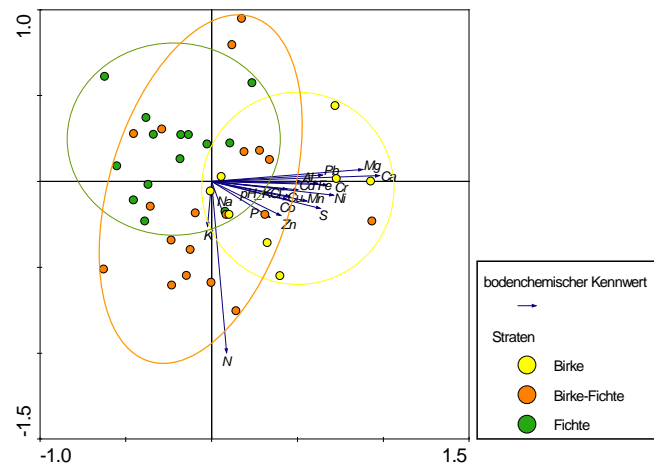


Abb. 77: PCA-Ordinationsdiagramm für die absoluten Elementgehalte aus dem Königswasseraufschluss, pH-Messung (KCl) sowie die Gehalte aus den N-Analysen für den Of-Horizont für die absoluten Werte

Tab. 33: Datentabelle für PCA-Ordinationsdiagramm für die absoluten Elementgehalte aus den Königswasseranalysen, die pH-Wert-Analysen in KCl sowie für die Gehalte aus den N-Analysen der drei Straten

Achsen	1	2	3	4
kumulative prozentuale Varianz der Daten	59,0	80,7	97,2	98,9

### Effektive Kationenaustauschkapazität

Die effektive Kationenaustauschkapazität, als wichtige Maßzahl für die Anzahl der tatsächlichen freien Kationenbindungsplätze bei entsprechenden pH-Wert im Boden, ist nachstehend für die drei Straten getrennt nach den einzelnen Oberbodenhorizonten dargestellt (Abb. 78). Dazu wurden die einzelnen Probepunkte für jedes Stratum gemittelt.

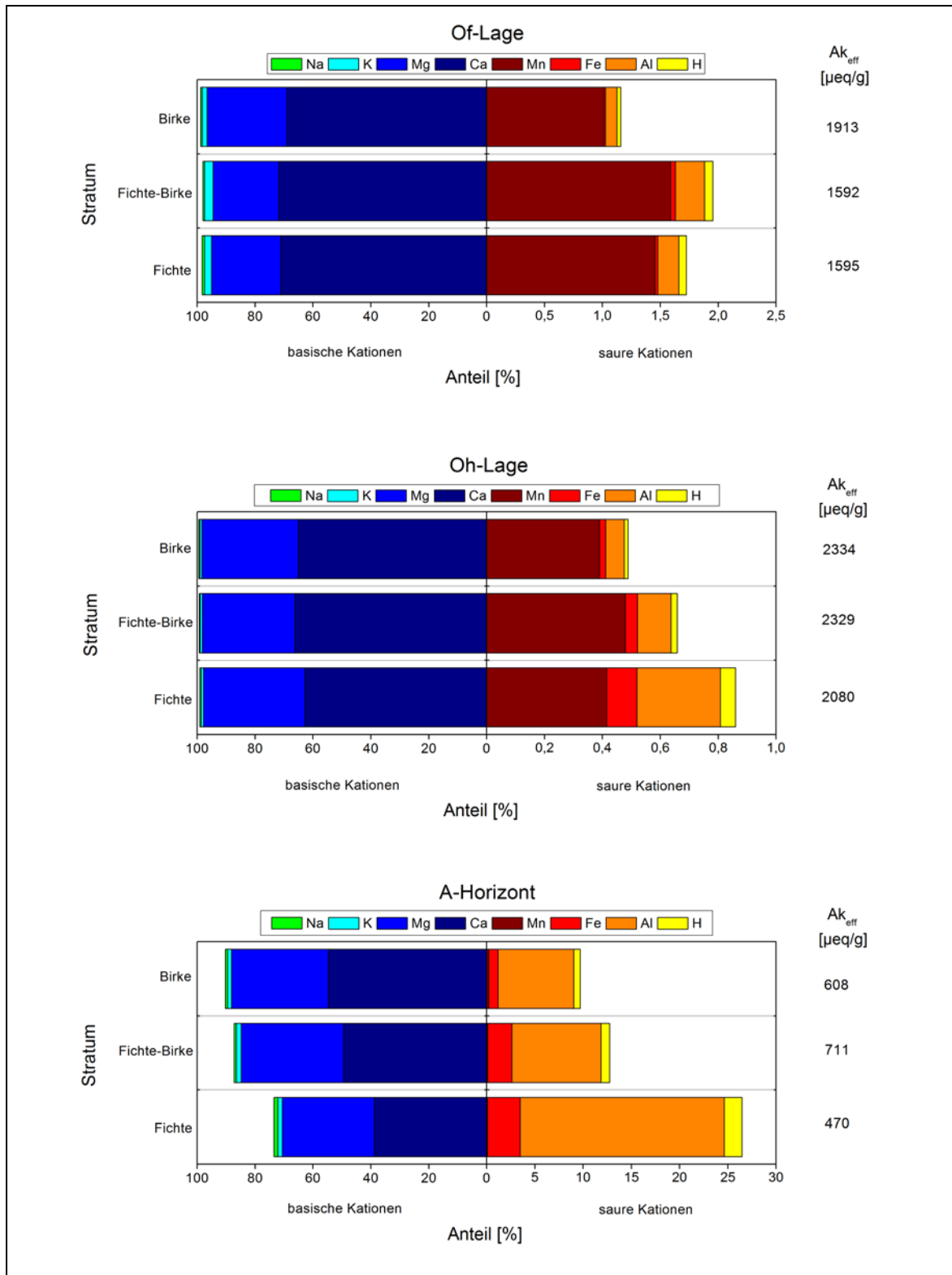
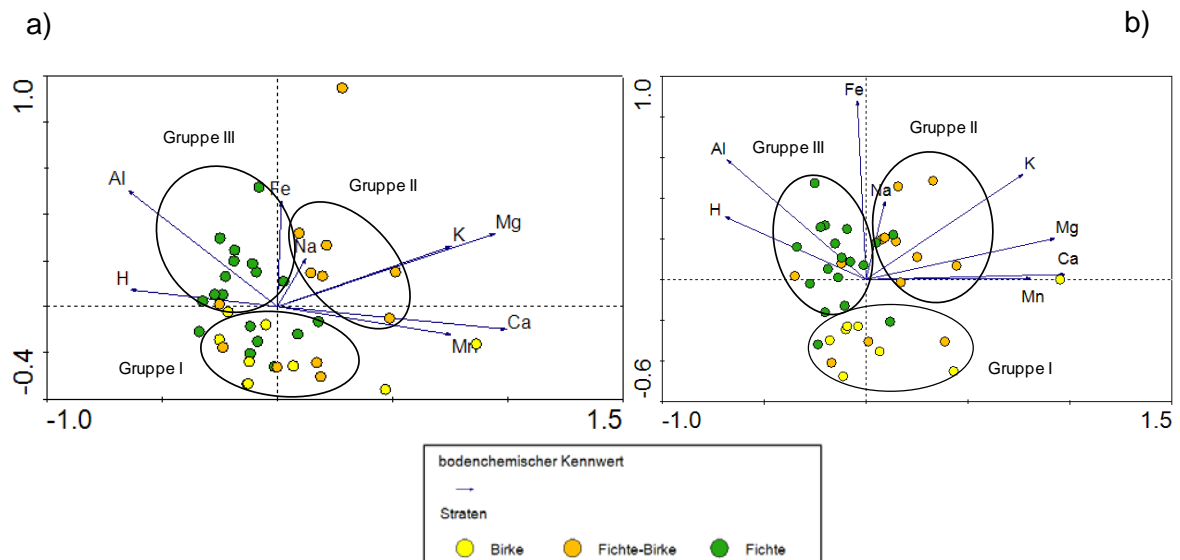


Abb. 78: mittlere Kationenaustauschkapazität [µeq/g] mit den dazugehörigen prozentualen Anteilen der BaCl<sub>2</sub>-extrahierbaren Kationen an der AK<sub>eff</sub> in den einzelnen Oberbodenhorizonten für die drei Straten

Dabei ist festzustellen, dass vor allem im A-Horizont ein Unterschied zwischen den Straten besteht. Hier überwiegen im Fichten-Stratum die sauren Kationen. Bei den basischen



Kationen fällt in diesem Horizont besonders für das Kation  $\text{Ca}^{2+}$  eine Zunahme vom Fichten- über das Fichten-Birken- hin zum Birken-Stratum auf. Im Vergleich zu den anderen beiden Straten besitzt das Fichten-Stratum im A-Horizont die niedrigste  $A_{\text{eff}}$ . Da die Differenzen zwischen den Straten für den A-Horizont sehr deutlich sind, wurde zusätzlich eine PCA durchgeführt, um auch die Streuung der einzelnen Punkte zu veranschaulichen (Ab. 79). Sowohl für die absoluten als auch für die relativen Werte können dafür die folgenden Befunde festgehalten werden. Die Werte des Birken-Stratum weisen dabei niedrigere austauschbaren  $\text{Fe}^{3+}$ -Werte auf. Die Gruppe III, in der sich vor allem Punkte des Fichten-Stratums befinden, ist vor allem durch die Lage entlang der zwei Vektoren des  $\text{Al}^{3+}$  sowie des  $\text{H}^+$  gekennzeichnet. Für die zweite Gruppe, in der viele Punkte des Fichten-Birken-Stratums liegen, sind vor allem anders als für Gruppe III höhere austauschbare Gehalte an  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  sowie  $\text{Mn}^{2+}$  prägend.



Ab. 79: PCA-Ordinationsdiagramme der Kationenaustauschkapazität des A-Horizontes, Berechnung a) mit absoluten Werten und b) mit standardisierten Werten

---

### **Fazit:**

*Signifikante Unterschiede zwischen Straten sind in der Of-Lage für den pH-Wert,  $C_{\text{ges}}$ -Vorrat,  $C_{\text{carbonat}}$ -Gehalt,  $N_{\text{ges}}$ -Gehalt,  $N_{\text{ges}}$ -Vorrat, und den metabolischen Quotienten nachweisbar. In der Oh-Lage sind es die nachstehenden Oberbodeneigenschaften:  $C_{\text{org}}/N$ -Verhältnis,  $C_{\text{ges}}$ -Gehalt,  $N_{\text{mik}}$ -Gehalt,  $C_{\text{mik}}/N_{\text{mik}}$ -Verhältnis, Basalatmungsaktivität, sowie der metabolische Quotient, die sich zwischen den Straten signifikant unterscheiden. Im A-Horizont zeigen sich signifikante Unterschiede der Straten beim  $C_{\text{org}}/N$ -Verhältnis,  $C_{\text{ges}}$ -Gehalt,  $C_{\text{carbonat}}$ -Gehalt,  $C_{\text{org}}$ -Gehalt sowie dem  $N_{\text{ges}}$ -Vorrat.*

*Durch die PCA für verschiedene Elementgehalte, der pH-Messungen sowie der C- und N-Gehalte können ebenfalls Unterschiede zwischen den Straten herausgearbeitet werden. Den größten Einfluss haben dabei die Elemente C, Mg, Ca und N. Die größte Streuung weist das Fichten-Birken-Stratum auf.*

*Die Auswertung der Daten der effektiven Kationenaustauschkapazität lässt vor allem für den A-Horizont Unterschiede zwischen den Straten erkennen. Dabei ist die  $Ak_{\text{eff}}$  im Fichtenstratum am kleinsten. Hier ist der prozentuale Anteil der sauren Kationen an der  $Ak_{\text{eff}}$  am größten. Die höchste  $Ak_{\text{eff}}$  besitzt das Birken-Stratum.*

## **5. Diskussion**

### **5.1 Kleinräumliche Veränderungen durch einzelbaumweise eingemischte Birken**

In diesem Kapitel wird die erste Hypothese geprüft: Einzelbaumweise eingemischte Birken in gekalkten Fichtenbeständen führen bereits zu kleinräumlichen Veränderungen (z. B. des Oberbodens oder der Bodenvegetation). Die Einmischung einzelner Birken führt im Oberboden zu höheren pH-Werten, höheren Gehalten an Calcium und Magnesium, engeren C/N-Verhältnissen, einer höheren mikrobiellen Aktivität und damit verbunden zu besseren Humusformen. Die Birke beeinflusst auch die Ressourcenverfügbarkeit für die Bodenvegetation (z. B. der photosynthetisch aktiven Strahlung) und verändert somit deren Artenanzahl, -zusammensetzung und Deckungsgrade. Zur Prüfung dieser Hypothese werden die Befunde der Strahlung, C/N-Verhältnisse, Bodenvegetation, pH-Werte, Humusmorphologie, weiterer ausgewählter bodenchemischer Parameter sowie der mikrobiellen Aktivität diskutiert.

#### **Strahlung und Kronenarchitektur**

Im Kap. 4.1 ist der Nachweis erbracht, dass durch die Variabilität bei der Überschirmung und der Kronenstrukturen in der reinen Fichtenfläche eine ähnliche Heterogenität der Ressource Strahlung in Bodennähe erreicht werden kann wie durch die Einmischung von Birken. Derartige Heterogenitäten der Strahlung, bedingt durch das Kronendach in Fichtenreinbeständen, konnten z. B. auch durch KÜßNER (1999), MACHADO und REICH (1999) sowie MÜLLER (2003) belegt werden. CANHAM et al. (1994) arbeiteten deutliche Unterschiede zwischen früh-, intermediär- und spätsukzessionalen Baumarten heraus. Unter schattentoleranten Baumarten ist es demnach am dunkelsten, hingegen sind der Strahlungsdurchtritt und die Häufigkeit von Sonnenflecken unter den frühsukzessionalen Baumarten wie der Birke am größten. Als typische Lichtbaumart hat die Birke orthotrop orientierte Triebe im Wipfelbereich und z. T. steile stammähnliche Äste (Architekturmodell „RAUH“ nach BARTELS 1993). Dagegen sind für ältere Fichten waagrecht wachsende Seitenäste charakteristisch (Architekturmodell „SCARRONE“ nach BARTELS 1993). Die Birke hat im Bestand die größte Kronenausdehnung und Blattmasse bei ca. 3/4 ihrer Höhe (HAGEMEIER 2002). Bei Fichten ist die Verteilung der Nadelmasse am Baum davon abhängig, ob sie frei steht oder nur im oberen Stammbereich eine Krone ausbilden

kann (MOREN et al. 2000; RÖHRIG et al. 2006). Geht man von der Kronenarchitektur aus, ist es beispielsweise nach SIREN (1955, zitiert nach REHFUESS 1986) durch die sonnenlichtabschirmende Fichtenkrone im Sommer unter Fichten kühler. Im Winter hingegen wirkt die Krone als Isolator vor der Kälte. Da die Birke im Winter ihr Laub verliert, erreicht mehr Sonnenlicht den Boden. So erwärmt sich der Boden unter Birke im Frühjahr schneller und die Bodenvegetation entwickelt sich zügiger als unter Fichte. Der höhere Strahlungsgenuss wirkt sich auch positiv auf die Stoffumsetzungsvorgänge aus (SCHRÖDTER und TIETJEN 1971/1972). Dadurch sind teilweise die günstigeren Verhältnisse bei der Humusqualität und -quantität unter Birke und wahrscheinlich in den Übergangsbereichen zur Fichte zu erklären.

### **Bodenvegetation**

Die Bodenvegetation stellt, wie im Kap. 3.2 beschrieben, eine sekundäre Variable dar. D. h., sie wirkt auf die Oberbodeneigenschaften direkt. Sie wird aber auch unmittelbar von ihnen beeinflusst. Die Einwirkung der Bodenvegetation auf den Nährstoffhaushalt von Wäldern kann z. T. sehr bedeutend sein (BOLTE et al. 2004). Die eigenen ermittelten  $C_{org}/N$ -Verhältnisse der Horizonte Oh und A waren unter der Birkenkrone bzw. im Übergangsbereich enger als unter Fichte. Die im Herbst 2007 aus den Kronen geernteten Birkenblätter wiesen ein C/N-Verhältnis von 48 auf. Die braunen Nadeln, die sich kurz vor dem Abfallen befanden, hatten ein wesentlich weiteres C/N-Verhältnis von 57. MITSCHERLICH (1975) teilt als C/N-Verhältnis für Birke 45-56 und für Fichte 48 mit. Nach HÖHNE (1963a) hat die Fichte auf Gneisstandorten des Tharandter Waldes mit 40 ein etwas günstigeres C/N-Verhältnis als die Birke mit 44. WITTICH (1961) gibt als C/N-Verhältnisse für Birke 45 und Fichte 48 an. In der Regel weisen die Pflanzensippen der Bodenvegetation günstigere C/N-Verhältnisse auf als der Baumbestand. Wichtige Arbeiten zu den Elementgehalten und der Pufferkraft bedeutender Pflanzensippen stammen beispielsweise von HÖHNE (1962, 1963a und b), BENNERT (1980) und HÖHNE et al. (1981). Danach hat *Calamagrostis villosa* im Tharandter Wald ein C/N-Verhältnis von 30. Auch *Deschampsia flexuosa* weist mit 33 ein ähnliches C/N-Verhältnis auf. Sehr enge C/N-Verhältnisse haben *Urtica dioica* ssp. *dioica* mit 11 und *Senecio ovatus* mit 21.

Für die gesamte Bodenvegetation (Kraut- und Moosschicht zusammen) war gerade in der reinen Fichtenfläche zu ersehen, dass die Sippenanzahl stark von den Lichtverhältnissen, abhängig ist. Auch bei den Gesamtdeckungsgraden der Fichtenfläche war eine Abhängigkeit zur Strahlung, die den Boden erreicht, festzustellen. Sie war aber nicht so stark

ausgeprägt wie bei der Gesamtsippenanzahl. Auch WAGNER et al. (2011) fanden für einen reinen Buchenbestand bezüglich der Gesamtdeckungsgrade eindeutige Zusammenhänge zur photosynthetisch aktiven Strahlung, die den Boden erreicht. Bei den Deckungsgraden gab es in den eigenen Befunden noch deutlichere Unterschiede beim Vergleich der beiden gemischten Baumarten mit der reinen Fichtenfläche. Diese Feststellung deutet darauf hin, dass hier noch andere Faktoren eine wichtige Rolle spielen. Die Ergebnisse der Sippenanzahl der Krautschicht zeigen sowohl für die reine Fichtenfläche als auch für die Fichten-Birken-Fläche starke Zusammenhänge zur Überschirmung. Auch TINYA et al. (2009) fanden eindeutige Beziehungen zwischen Licht und Artenvielfalt in der Krautschicht. In der vorliegenden Arbeit gab es aber auch bei den Deckungsgraden diese Tendenz, jedoch war sie nicht so deutlich wie bei der Sippenanzahl. TINYA et al. (2009) konnten dagegen keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Deckungsgrad der Krautschicht und dem Licht finden. Bei den eigenen Befunden der Sippenanzahl der Mooschicht sind ebenfalls die Lichtverhältnisse sehr bedeutend. Doch dabei traten noch deutlichere Unterschiede beim Vergleich der beiden Baumarten als innerhalb der reinen Fichtenfläche auf. Bei diesen Befunden ist davon auszugehen, dass die gewonnenen Ergebnisse aus den reinen Fichtenbereichen den Bedingungen von Fichtenreinbeständen entsprechen. Ähnliche Tendenzen der Artenanzahl konnten SCHMIDT und WECKESSER (2001) in Mischbeständen aus Fichte und Buche feststellen. Dabei verhielten sich die Mischbestände intermediär und wiesen in den Altbeständen sowohl für buchen- als auch für fichtendominierte Teilquadranten ähnlich hohe Artenzahlen auf. Reine Fichtenaltbestände boten die höchsten Artenzahlen auf, die Buchenaltbestände die niedrigsten. In jüngeren Altersklassen gibt es diese Tendenzen nicht.

Im Gegensatz zu den eigenen Befunden fanden WALLRUP et al. (2006) unter Birke (*Betula pendula* und *Betula pubescens*) eine höhere Artenvielfalt als unter Fichte. Einige Gefäßpflanzen (inklusive der Baumartenverjüngung) kamen vermehrt unter Birke vor. Die Anzahl der Naturverjüngung der Bäume unterschied sich nicht zwischen Birke und Fichte. Die Autoren sahen aber auch im Gegensatz zu den eigenen Befunden keine Baumarteneffekte auf den Boden-pH oder die Bedeckung mit Moosen und Flechten. BARBIER et al. (2008) arbeiteten bei dem Vergleich von Laub- und Nadelwäldern in 10 Laubwaldbeständen einen höheren Artenreichtum heraus, aber auch in 5 Nadelwaldbeständen gab es höhere Artenanzahlen. SAETRE et al. (1997) ermittelten in Süd- und Mittelschweden höhere Deckungsgrade und Artenanzahlen von krautigen Pflanzen in Fichten-Birken-Mischbeständen als in Fichtenreinbeständen, aber niedrigere Deckungsgrade und Artenanzahlen von Moosen. Sie erklären es mit der Streu von Birken. Diese Ergebnisse decken

sich nicht mit den eigenen Befunden. Dabei waren zwar die Sippenanzahlen der Kraut- und Moosschicht im Fichten-Birken-Bereich im Vergleich mit den dunklen reinen Fichtenbestandespartien höher, aber ähnlich hoch im Vergleich mit den helleren reinen Fichtenbereichen. Die Deckungsgrade der Kraut- und Moosschicht waren im Fichten-Birkenbereich jeweils eindeutig höher als im reinen Fichtenteil. WAGNER et al. (2011) haben für die Trauben-Eiche (*Quercus petraea*) einen verdämmenden Effekt der Eichenstreu auf den Deckungsgrad der Moosschicht nachgewiesen. Nach eigener Auffassung ist dieser klare Zusammenhang bei Birken aufgrund der Blattmorphologie und deren schnelleren Zersetzung nicht so stark zu vermuten wie bei Eichen oder Buchen. Für die bei den eigenen Untersuchungen ermittelten höheren Deckungsgrade unter Birke wäre eine Erklärung, dass es neben dem höheren Strahlungsangebot möglicherweise mehr Feuchtigkeit in der Humusauflage unter der Birkenkrone im Vergleich zur Fichte gibt. Hinweise darauf geben die Befunde von TISCHER (2009). Die durchgeführte PCA mit den Daten der kartierten Vegetation (Kap. 4.2.2) zeigt eine deutliche Differenzierung zwischen den verschiedenen Straten. Außerdem deutete sich an, dass für die Unterscheidung der Gruppen die Verfügbarkeit der Ressourcen Strahlung und Feuchte bzw. die Effekte der Baumindividuen auf deren Verfügbarkeit entscheidend sind. SAETRE (1999) stellte fest, dass sich mit steigenden Dichten der Fichten der Deckungsgrad an krautigen Pflanzen und einigen Moosarten verringerte. Diese Beobachtung deckt sich mit den eigenen Befunden. Auch die Zusammensetzung der einzelnen Strahlungsbestandteile (direkte und diffuse Strahlung) führt zu signifikanten Unterschieden der Reaktion von verschiedenen Pflanzenarten (LARCHER 2001 zitiert nach WAGNER et al. 2011). TRANQUILLINI (1960) konnte im Gegensatz dazu durch seine differenzierte Messung einzelner Spektralbereiche keine nennenswerte selektive Filterwirkung der Fichtenbestände feststellen. Auch AMMER (2000) fand zwischen überschirmten Bestandesteilen und einem „Bestandesloch“ nur geringfügige Unterschiede in der Strahlungsqualität. FELTON et al. (2010) wiederum betonen, dass die Bodenvegetation stark von der Zusammensetzung und Struktur des Kronendaches, über dessen Einfluss auf die Temperatur, das Licht, das Wasser und die Nährstoffe im Boden (SAETRE et al. 1999) und auf die physikalischen Merkmale der Humusauflage (BARBIER et al. 2008) mitgeprägt wird.

Hervorzuheben ist eine Auswahl von Sippen, deren relative Stetigkeit beständig zwischen den Straten abnimmt. Das foliose Lebermoos *Lophocolea bidentata* var. *bidentata* ist nach TISCHER (2008) eine Sippe, die möglicherweise indikativ für den Lichtgradienten und mit einiger Einschränkung (unterschiedliche Physiologie der Moose im Vergleich zu den Gefäßpflanzen) auch für einen Säure- und einen Feuchtegradienten stehen kann. Sie

gilt als Halblucht- und Mäßigsäurezeiger sowie als Pflanze frischer bis feuchter Wuchsorte (DÜLL 1997). Bei den eigenen Befunden sank ihre relative Stetigkeit in den Straten wie folgt: Birke > Fichte-Birke > Fichte. Das könnte also mit der abnehmenden Strahlungsverfügbarkeit sowie der sinkenden Feuchte und dem sinkenden pH-Wert der Humusaufgabe zusammenhängen. SAETRE (1999 zit. n. TISCHER 2009) fand für das boreal-montan verbreitete Laubmoos *Brachythecium reflexum* in Schweden eine Bindung an die Bereiche der Birke und abnehmende Präsenz mit der Zunahme des Einflusses von Fichte. Auch bei den eigenen Befunden ist für das häufig in feuchteren Grasfluren des Offenlandes vorkommende Lebermoos *Lophocolea bidentata* var. *bidentata* vom Fichten-Stratum über das Fichten-Birken-Stratum hin zum Birken-Stratum eine Zunahme der relativen Stetigkeit festzustellen gewesen. *Cardamine flexuosa* kommt mit hoher Artmächtigkeit im Birken-Stratum und stetig im Fichten-Birken-Stratum vor. Diese Art ist nach ZERBE und MEIWES (2000) typisch für Bereiche, in denen z. B. durch Windwurf des Fichtenaltbestandes und anschließender Sukzession durch Weichlaubhölzer der Humusabbau und die Nährstofffreisetzung schnell und in hoher Menge stattgefunden haben. *Oxalis acetosella* war in den eigenen Untersuchungen vor allem unter Fichte zu finden. TINYA et al. (2009) konnten für diese Art keine signifikante Korrelation mit dem Licht feststellen. Das deutet darauf hin, dass für das Auftreten von *Oxalis acetosella* andere Faktoren ausschlaggebend sind (vgl. z. B. RODENKIRCHEN 1998). An dieser Stelle ist also festzuhalten, dass die Sippenanzahl und z. T. auch die Deckungsgrade über das Lichtregime gesteuert werden können. So ist es auch möglich, in Reinbeständen Strukturvielfalt bei der Bodenvegetation zu erzeugen. Betrachtet man die Arten aber einzeln, gibt es solche, die sehr gut über das Lichtregime zu steuern sind, andererseits gibt es Arten, deren Präsenz wohl vor allem von den Oberbodeneigenschaften (z. B. Acidität, pflanzenverfügbares Wasser) abhängig ist. Dabei ist zu beachten, dass natürlich auch die Strahlung den Wasserhaushalt beeinflusst, aber dass, ebenfalls unabhängig von der Strahlung, kleinstandörtliche Unterschiede hinsichtlich des pflanzenverfügbaren Wassers im Oberboden eine Rolle spielen. Eine Ursache dafür können auch baumartenbedingte physikalische Substratunterschiede (z. B. durch die Streuzusammensetzung und die Baumwurzelverteilung) sein.

Weiterhin gibt es Hinweise dafür, dass Synergien oder Antagonismen zwischen den einzelnen Ressourcen auftreten. Die Transektuntersuchungen haben ergeben, dass sich die Deckungsgrade der Sippen sowie die Sippenanzahl mit zunehmendem Abstand vom Stamm erhöhen. Diese Tendenz ist auch im nördlichen und nordwestlichen Teil des Transektes Fichte-Birke 1 bis unter die angrenzenden Fichten festzustellen, im südöstlichen Bereich allerdings nicht. Deshalb ist zu vermuten, dass der Strahlung dabei eine

wichtige Bedeutung zukommt und sie möglicherweise komplementär zur Feuchte wirkt. Wahrscheinlich sind auch die abgestuften mittleren Sippenanzahlen zwischen den drei Straten auf das komplementäre Verhalten verschiedener Ressourcen zurückzuführen. Denkbar ist, dass eine heterogenere und/oder höhere Ressourcenverfügbarkeit unter der Birke eine höhere Nischenvielfalt auslöst, die sich in der höheren Artanzahl und der Mehrschichtigkeit der Kraut- und Mooschicht ausdrückt (BARKMANN 1992; SIMMONS und BUCKLEY 1992).

### **Acidität, biologische Aktivität und Bestandesalter**

Neben den Effekten des Bestandesalters auf die Bodenvegetation konnte auch für die Humuseigenschaften durch verschiedene Veröffentlichungen nachgewiesen werden, dass sie sich in verschiedenen Bestandesaltern (z. B. FRANKLAND 1998; BÖTTCHER und SPRINGOB 2001), Umbaualtern (z. B. FISCHER et al. 2002) und Einzelbaumaltern (z. B. SCHUA et al. 2007) unterscheiden. Es ist ebenso bei Birke und Fichte davon auszugehen, dass eine Altersabhängigkeit der Baumarteneffekte existiert. Dabei ist aber zu beachten, dass eine Pionierbaumart wie die Birke nicht so hohe Alter erreicht wie beispielsweise eine Buche oder Eiche. Mit zunehmendem Alter verliert die Birke in Fichtenbeständen des Untersuchungsgebietes aufgrund der Höhenlage und der damit verbundenen klimatischen Bedingungen sowie durch die Konkurrenz der Fichte schon bis zum Alter 60 an Vitalität. Außerdem sind ältere Birken in Fichtenbeständen des Erzgebirges nur selten zu finden, da sie früher üblicherweise „herausgepflegt“ wurden (siehe dazu auch Kap. 6). Bei den bodenchemischen Kennwerten existieren klare Altersabhängigkeiten der Baumarten (z. B. MILES 1981; BRANDTBERG et al. 2004).

In den eigenen Befunden lagen die pH-Werte des Of-Horizontes unter der Birkenkrone etwa eine Einheit höher als im Bereich der reinen Fichte. Diese Ergebnisse decken sich mit der internationalen Literatur (z. B. SAETRE 1998; BRANDTBERG et al. 2000; BRANDTBERG und SIMONSSON 2003; BRANDTBERG und LUNDKVIST 2004). HAGEN-THORN et al. (2004) fanden in Dänemark, Südschweden und Litauen im Mineralboden von 30-40 Jahre alten Birkenplots pH-Werte ( $H_2O$ ) von 5,0 (0-10 cm) und 5,2 (20-30 cm) und Fichtenplots 4,3 (0-10 cm) und 4,5 (20-30 cm). AUGUSTO et al. (2002) fassten zusammen, dass der pH-Wert des Oberbodens auf gleichem Standort unter der Birke im Mittel 0,43 Einheiten höher ist als unter Fichte. Für den Regenwurmbesatz (Anzahl und Masse) sind diese Unterschiede durchaus bedeutsam, was HUHTA (1979) durch seine Experimente beweisen konnte. Nach SAETRE (1998 und 1999) und SAETRE und BÅÅTH



(2000) gibt es positive Wirkungen der Birke auf die mikrobielle Biomasse und die Masse an Regenwürmern sowie Effekte auf die Struktur der Mikrobengemeinschaften. Mit zunehmendem Birkeneinfluss steigt die Menge an Bodenorganismen, die auch auf gekalkten bzw. gedüngten Böden zu finden sind und im Zusammenhang mit höheren pH-Werten stehen (SAETRE 1998, 1999 und SAETRE und BÅÅTH 2000 zit. n. TISCHER 2009). Bei den eigenen Befunden finden sich bei den  $C_{\text{mik}}$ -Gehalten und -Vorräten sowie  $N_{\text{mik}}$ -Vorräten keine signifikanten Unterschiede. Zu beobachten war aber, dass der  $C_{\text{mik}}$ -Gehalt aus der Fumigations-Extraktion unter Birke größtenteils höher als unter Fichte war. Lediglich die  $N_{\text{mik}}$ -Gehalte im Oh-Horizont unterschieden sich zwischen den drei Straten signifikant (Birke > Fichte-Birke > Fichte). Also zeigten sich bei  $N_{\text{mik}}$  im Oh-Horizont höhere Werte unter Birke als unter Fichte. Diese Tendenz konnte bei PRIHA et al. (2001) auch bei der Berücksichtigung des Bodenvolumens festgestellt werden. Im A-Horizont ist ein umgekehrter Trend sichtbar. Dieser Trend der Horizonte bestätigte sich in den eigenen Analysen auch bei der Darstellung des Quotienten aus mikrobieller Biomasse-C zu Gesamt-C des Bodens bzw. Biomasse-N zu Gesamt-N des Bodens. Auch beim  $C_{\text{mik}}/N_{\text{mik}}$ -Verhältnis, der Basalatmungsaktivität sowie dem Verhältnis Basalatmung/ $C_{\text{ges}}$  waren die Befunde im Oh-Horizont signifikant höher unter Birke. Der metabolische Quotient war im Of unter der Birke kleiner als unter Fichte. PRIHA et al. (2001) haben zusätzlich auch die PLFA (Phospholipid-Extraktion) durchgeführt. Ihre Befunde machten deutlich, dass dabei die Menge von mikrobiellen PLFAs unter Birke niedriger war als unter Fichte. Bezüglich der biologischen Aktivität wies MILES (1981) in Schottland eindeutig höhere Anzahlen an Regenwürmern in den mittelalten und älteren Birkenbeständen nach. ROTHE und BINKLEY (2001) betonen, dass das Edaphon eine Schlüsselrolle bei der Zersetzung der Streu spielt (z. B. LAVELLE 1994; BRUSSAARD 1998) und die faunistischen Lebensgemeinschaften stark von der Baumart beeinflusst werden (KIENZLER et al. 1986; WEIDEMANN und SAUERMAN 1986).

Somit könnten die Birken auch auf die Wurzeln der Fichten über den pH-Wert einen positiven Einfluss ausüben. Denn das Wachstum und die Form von Fichtenwurzeln sind stark von den chemischen Eigenschaften des Bodenwassers abhängig (BREDEMEIER et al. 1995). Saure Bedingungen hemmen das Wurzelwachstum (z. B. QIAN et al. 1998) und führen so zu einer schlechteren Durchwurzelung und Feinwurzelverteilung im Mineralboden sowie zu einer Konzentration in der organischen Auflage (z. B. PUHE 1994). Aufgrund der Erhöhung des pH-Wertes durch Birken könnten bei der Fichte toxische Effekte durch Aluminium, die in der Literatur aber kritisch diskutiert wurden (z. B. FEGER 1996), eingeschränkt werden.

### **Humusmächtigkeit**

Die Mächtigkeit der Humusauflage im Raum kann sehr variabel sein (z. B. LISKI 1995 und BENS et al. 2006). Bei den eigenen Befunden zeigte sich eine Zunahme der Oh-Mächtigkeit innerhalb des Birken-Stratums zum Kronenrand hin. MOORE (1986) betont, dass im Verhältnis zum Of-Horizont die Veränderungen in der Streuqualität und -quantität sowie der Dynamik der Umsetzung im Oh-Horizont langsamer erfolgen. Das ist auch eine Erklärung für die eigenen deutlicheren Ergebnisse im Of-Horizont. Die Analysen von WÄLDER et al. (2008) deuten darauf hin, dass der Zutritt von Niederschlag einen positiven Effekt auf die Streuzersetzung im Of bewirkt. Am Kronenrand treffen die Wirkungsbereiche verschiedener Individuen aufeinander (ZINKE 1962; HIRABUKI 1991; SAETRE und BÅÅTH 2000). In den stammnahen Bereichen fanden sich höhere Mächtigkeiten. Ursache dafür ist wohl der für den stammnahen Bereich typische hohe Input an Streu (HIRABUKI 1991). ZINKE (1962) und BENS et al. (2006) vermuten, dass hier vor allem die schwer zersetzbare Borkenstreu eingetragen wird. PRIHA und SMOLANDER (1999) sowie SMOLANDER et al. (2005) verweisen auf eine höhere Horizontmächtigkeit der Auflagehorizonte im Fichtenbestand im Vergleich mit einem gleichaltrigen Birkenbestand.

### **C/N-Verhältnis**

Eine Steuergröße der Zersetzungsgemeinschaft im Waldboden ist die Streuqualität (C/N-Verhältnis, abbauförderliche Gehalte an löslichen Kohlenhydraten, Gehalte schwer zersetzbarer Substanzen wie Lignin, Polyphenole und Tannine). Unterschiede zwischen Birken- und Fichtenstreu sind in den Gehalten zersetzungshemmender Inhaltsstoffe wie Tanninen, Cutin und Wachsen zu erwarten (vgl. LORENZ et al. 2000). Hinzu kommen physikalische und weitere chemische Bodeneigenschaften wie der pH-Wert, der das Pilz-Bakterien-Verhältnis und die Biodiversität der Mikroflora beeinflusst, sowie klimatische Faktoren (FIEDLER 2001). Neben dem pH-Wert und der Humusmächtigkeit gilt das C/N-Verhältnis als ein wichtiges Merkmal für die Umsetzungsbedingungen der organischen Substanz. Je enger die C/N-Verhältnisse sind, desto höher sind üblicherweise die Humusmineralisation und -umsetzung und damit die Stickstoffversorgung der Bestände. Infolge jahrzehntelanger atmosphärischer Stickstoffdepositionen in Waldökosystemen hat das C/N-Verhältnis als differenzierende Größe an Bedeutung verloren (FISCHER et al. 2002). ZEZSCHWITZ (1985) beschreibt für das rheinisch-westfälische Bergland, dass sich teilweise Widersprüche zwischen C/N-Quotient und Humusmorphologie ergeben. Das trifft auch für die vorliegenden Analysen zu. Trotzdem können für einige Gebiete aktuell noch

klassische Beziehungen zwischen Stickstoffstatus (C/N) und Humusmorphologie nachgewiesen werden, z. B. für das Norddeutsche Tiefland durch BARITZ (2003) und SCHUA et al. (2007). Im Untersuchungsgebiet Olbernhau beeinflussen aber nicht nur die anthropogenen Immissionen von Stickoxiden und Ammoniak den Humuszustand sondern auch zusätzlich die Kalkung. In der Summe dürfte es zu einer Verengung der C/N-Verhältnisse gekommen sein. Die Befunde der vorliegenden Arbeit decken sich mit Ergebnissen anderer Autoren, die eine Entkopplung des chemischen Humuszustandes und der Humusmorphologie feststellten (vgl. LFP 2004). Neben den schon genannten Ursachen für die Verengung des C/N-Verhältnisses ist auch zu erwähnen, dass heute keine Streu mehr genutzt wird und die Waldböden die Chance haben, sich zu erholen. Bezogen auf das Gesamt-C/N-Verhältnis war in den eigenen Befunden für den Of-Horizont kein baumartenspezifischer Trend zu erkennen (Abb. 68). Für die Horizonte Oh und A konnten höchst signifikante Unterschiede zwischen den drei Straten festgestellt werden. Dabei waren die C/N-Verhältnisse im Oh-Horizont des Fichten-Stratums am weitesten. Für den A-Horizont ist für die C/N-Verhältnisse die folgende Reihenfolge anzugeben: Birke < Fichte-Birke < Fichte. PRIHA und SMOLANDER (1999) veröffentlichten Ergebnisse, wonach der  $N_{\text{ges}}$ -Gehalt insgesamt unter dem Birkenbestand niedriger als im gleichaltrigen Fichtennachbarbestand ist. Das kann für die eigenen Befunde für den A-Horizont signifikant für  $\alpha = 0,05$  bestätigt werden. Die C/N-Verhältnisse des Oh-Horizontes liegen zwischen 13 und 22. Es sind gemäß des AK STO (2003) mäßig enge bis mittlere C/N-Verhältnisse, die für den F-Mull (14-17), den mullartigen Moder (17-20) und für den feinhumusarmen Moder (20-24) charakteristisch sind. Solche Verhältnisse auf diesem Standort eher nicht zu erwarten. Für die kartierten Humusformen feinhumusarmer rohhumusartiger Moder und feinhumusreicher rohhumusartiger Moder sind die meisten gemessenen C/N-Verhältnisse zu eng. Im Of-Horizont gibt es für die  $N_{\text{ges}}$ -Gehalte keine wesentlichen Unterschiede, und im Of-Horizont sind die Werte unter Fichte signifikant am niedrigsten. LETTL und HYSEK (1994) sprechen dagegen davon, dass der  $N_{\text{ges}}$ -Gehalt im Of-Horizont unter Fichte höher ist, während im Oh-Horizont der  $N_{\text{ges}}$ -Gehalt bei Fichte unter dem der Birke liegt. BRANDTBERG und LUNDKVIST (2004) wiesen, anders als bei den eigenen Befunden, für die Fichten-Birken-Mischbestände im Vergleich mit Fichtenreinbeständen bessere Humusqualitäten durch günstigere C/N-Verhältnisse nach. HAGEN-THORN et al. (2004) fanden bei ihren Untersuchungen keine signifikanten Unterschiede zwischen Birke und Fichte beim Bodenkohlenstoff und -stickstoff sowie dem C/N-Verhältnis im mineralischen Oberboden (0-10 cm und 20-30 cm Tiefe in 30 bis 40 Jahre alten Baumartenplots). Einer Untersuchung von BRANDTBERG et al. (2000) in einem 20-30 Jahre alten Fichten-Birkenmischbestand zufolge, waren keine Unterschiede im  $C_{\text{ges}}$ - und  $N_{\text{ges}}$ -Gehalt zwi-

schen den Böden unter den beiden Arten auszumachen. Dabei ist möglicherweise die Wirkungsdauer von 20-30 Jahren noch zu gering, um Baumartenunterschiede auszubilden.

### **Elementgehalte**

BRANDTBERG et al. (2000) fanden im Humus von Fichten-Birken-Mischbeständen höhere Konzentrationen von Calcium und Magnesium im Vergleich zu Fichtenreinbeständen. Die eigenen Befunde können höhere Calcium- und Magnesiumgehalte unter der Birke im Vergleich zur Fichte bestätigen. Das Fichten-Birken-Stratum nimmt dabei eine Zwischenstellung ein. In diesem Stratum war die Streuung der Daten allerdings sehr stark, da alle Mischpunkte einbezogen wurden. Einige davon lagen näher an den Fichten, andere näher an den Birken. An dieser Stelle wird die Bedeutung der Vielfältigkeit der Mischungssituationen von Birken und Fichten für die Untersuchungsergebnisse sehr deutlich.

### **Fazit**

*Die Befunde dieser Arbeit bestätigen die erste Hypothese, wonach bereits einzelbaumweise eingemischte Birken in Fichtenbeständen zu kleinräumlichen Veränderungen der Oberbodeneigenschaften (z. B. pH-Wert, C/N-Verhältnis, weitere ausgewählte bodenchemische Parameter, mikrobielle Aktivität, Humusmorphologie) und der Bodenvegetation führen.*

### **5.2 Einflussbereiche der Baumarten**

In diesem Kapitel wird bezüglich der zweiten Hypothese geprüft, ob die positiven Veränderungen der Oberbodeneigenschaften durch Birke nur auf die Bereiche beschränkt sind, in denen Birkenstreu einen Einfluss hat. Hierfür sollen die gewonnenen Ergebnisse sowohl horizontal, also hinsichtlich der Entfernung vom Birkenstamm, als auch vertikal, folglich wie tief der Einfluss in den Boden reicht, diskutiert werden.

### **Streumenge und -verteilung**

Das in dieser Arbeit verwendete Modell WaldStat impliziert die Annahme, dass es mit zunehmenden BHD eine Erhöhung der Blattmasse gibt (vgl. Kap. 3.5). An dieser Stelle wird deshalb darauf hingewiesen, dass ältere Bäume im Stadium der Seneszenz zwar einen hohen Brusthöhendurchmesser aufweisen, aber auf Grund ihrer abnehmenden Vitalität der Einfluss ihrer Laubstreu verhältnismäßig gering ist (FERRARI und SUGITA 1996). Wie schon beschrieben, handelt es sich bei den Birken der Untersuchungsfläche um ca. 60 Jahre alte Bäume. Nach MITCHELL (1974, zitiert nach ATKINSON 1992) fallen Birken ab diesem Alter in das Stadium der Seneszenz, was auch die Ertragstafeln von TJURIN (1956), TJURIN und NAUMENKO (1956), SCHOBER (1995) sowie LOCKOW (1996) deutlich machen. Die geringe Vitalität vieler Birken dieser Fläche wird also bestimmt durch das Alter, jedoch ebenso über die Konkurrenz und die Standortbedingungen. Durch die in das Modell einfließenden Streufallmessungen erfolgt aber eine Kalibrierung des Modells an die bestandesspezifischen Blattmassen. In der vorliegenden Arbeit ist der Faktor Vitalität in den modellierten Ergebnissen also berücksichtigt. Aus den ermittelten Einzelbaumblattmassen können Jahreswerte für einen Hektar hergeleitet werden. Nimmt man dafür an, dass rund 300 Birken auf einem Hektar stehen, so kann eine Streumenge von  $1,9 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$  für weniger vitale Birken und  $2,6 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$  für sehr vitale Birken bei einem Referenz-BHD von 37,9 ermittelt werden. Diese Werte decken sich mit der internationalen Literatur. Nach AUGUSTO et al. (2002) produziert die Birke im Mittel etwa  $2,2 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$ . Das sind laut diesen Autoren etwa 60 % der Streumenge von Fichte ( $3,8 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$ ). Doch täuscht dieser Vergleich eine höhere Streumengenproduktion der Fichten vor, denn geht man davon aus, dass 300 Birken auf dem Hektar stehen, dann würden sich bei gleicher Dimension beispielsweise ca. 500 Fichten auf dem Hektar befinden. Rechnet man also den von AUGUSTO et al. (2002) angegebenen mittleren Wert von  $3,8 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$  durch 500 Fichten, so erhält man für eine Fichte einen Wert von  $0,0076 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$ . Dieser kann dann wieder mit 300 multipliziert werden, und somit ergibt sich ein ähnlicher Flächenwert wie der von Birken, nämlich  $2,3 \text{ t/ha} \cdot \text{a}$ . Aus dieser kleinen Beispielrechnung wird klar, wie schwierig es ist, die beiden Baumarten quantitativ zu vergleichen. Weil die Birke einen höheren Standraum beansprucht, lassen sich geringere Biomassen in diesen Beständen feststellen. Demzufolge werden auch weniger Stoffe gespeichert, z. B. Kohlenstoff. Geht es um Speicherpotenziale (z. B. die Sequestrierung von Kohlenstoff in Beständen), bietet sich eine flächenbezogene Datenbetrachtung an. Sucht man hingegen nach Erklärungen und Abläufen für einzelne Prozesse, so scheint die Betrachtung der Einzelbaumebene die bessere Herangehensweise zu sein. Da es auch noch nicht völlig klar ist, welche Mi-

schungsintensitäten anzustreben sind, fehlen auch noch Angaben zu Baumanzahlen bei der Arten pro Hektar. In Kap. 6 wird dieses Problem ausführlich diskutiert.

### **Oberbodeneigenschaften**

Unterhalb der Birkenkrone und auch noch etwas darüber hinaus sind in Olbernhau deutliche Verbesserungen bestimmter Oberbodeneigenschaften festgestellt worden. Diese reichten bis maximal 10 m vom Birkenstamm entfernt und schwächten sich außerhalb des Kronenrandes ab. Ähnliche Beobachtungen machten CARLI und DRESCHER (2002) für eine andere Pionierbaumart (*Populus tremula*) in einem Fichtenbestand. Dabei stellten sie ebenfalls deutliche Humusverbesserungen bis über den Kronenrand hinaus fest. Die eigenen Befunde zeigen, dass es der Bereich ist, in dem auch noch Birkenstreu einen Einfluss hat.

In den meisten Untersuchungen zu Effekten von Baumarten auf chemische Bodeneigenschaften ist deren Einflussbereich auf die Humusaufgabe und obersten Dezimeter des Mineralbodens beschränkt (vgl. Review von AUGUSTO et al. 2002). HAGEN-THORN et al. (2004) fanden im mineralischen Oberboden (in 30 bis 40 Jahre alten Baumartenplots) deutlichere Unterschiede bei den bodenchemischen Parametern in den oberen 10 cm als im Bereich zwischen 20-30 cm. Dabei waren nur die pH-Werte und die austauschbaren Eisen-, Aluminium- sowie Kupfergehalte in 20-30 cm zwischen den Baumarten Birke und Fichte signifikant unterschiedlich. In den oberen 10 cm gab es häufiger deutliche Unterschiede. In den eigenen Analysen zeigen sich ähnliche Trends. Dabei konnten aber keine allgemein gültigen vertikalen Verläufe erkannt werden. Vielmehr ist offensichtlich geworden, dass sich bei den einzelnen Kenngrößen verschiedene Muster im vertikalen Verlauf bilden. Die meisten relevanten Befunde zwischen den Straten treten in der Of- und Oh-Lage auf. Jedoch wurden auch im A-Horizont für das C/N-Verhältnis, den  $C_{\text{ges}}$ -,  $C_{\text{carbonat}}$ -,  $C_{\text{org}}$ - und  $N_{\text{ges}}$ -Gehalt signifikante Befunde ermittelt.

#### **Fazit:**

*Die zweite Hypothese wird bestätigt: Die positiven Veränderungen der Oberbodeneigenschaften durch die Birke sind nur auf die Bereiche beschränkt, in denen Birkenstreu einen Einfluss hat. Dabei spielen aber nicht nur unmittelbar die Streu, sondern wohl auch andere Faktoren eine Rolle (vgl. Kap. 3.2 und 5.3).*

### **5.3 Mess- und Berechenbarkeit von Einzelbaumeffekten**

Dieses Kapitel widmet sich der Prüfung der dritten Hypothese: „Einzelbaumeffekte sind mess- und berechenbar.“ Es werden verschiedene Faktoren, die die Mess- und Berechenbarkeit der Einzelbaumeffekte beeinflussen, diskutiert.

#### **Einfluss von Wachstumsparametern**

Um Wachstumsparameter von Bäumen zu beschreiben, gibt es inzwischen zahlreiche Rechenansätze. Für die vorliegende Arbeit wurde für die Berechnung der Strahlung auf solche zurückgegriffen, die für die sächsischen Verhältnisse repräsentativ sind und für das Model Brook S entwickelt wurden (DÖBBELER et al. 2007). Diese können aber nur für die Bereiche genutzt werden, in denen Reinbestandscharakter herrscht. Alle Abschnitte, die Mischungscharakter aufwiesen, wurden der Genauigkeit halber auf der Untersuchungsfläche eingemessen. Bisher gibt es keine für Sachsen repräsentativen Formeln, die für derartige Mischbestände aus Fichte und Birke verwendet werden können. Doch gibt es einige Arbeiten, die sich den waldwachstumskundlichen und waldbaulichen Herausforderungen von stärker strukturierten bzw. gemischten Beständen widmen. Für Fichten-Birken-Mischungen existieren derartige Modelle vor allem im skandinavischen Raum, z. B. JÖGISTE (1998) und FAHLVIK et al. (2005). STERBA (2004) entwickelte Ansätze für Ausgleichskurven und Wachstumsmodelle für ungleichaltrige Bestandesstrukturen der Baumarten *Picea abies*, *Abies alba*, *Larix europaea*, *Fagus sylvatica* und *Pinus sylvestris*. Bestandesmodelle für Mischbestände aus gleichaltrigen Mischbaumarten wurden beispielsweise von MIELIKÄINEN (1980), AGESTAM (1985), EKÖ (1985) sowie GOBAKKEN und NÆSSET (2002) entwickelt. Derartige Forschungsarbeiten sind zukünftig nicht nur aus waldbaulicher und waldwachstumskundlicher, sondern auch aus bodenkundlicher Sicht (z. B. für die Modellierung der Kohlenstoff- oder Stickstoffsequestrierung) äußerst relevant. Sie können wichtige Informationen zur Modellierung der überirdischen Stoffspeicherung liefern.

#### **Einfluss von Deposition und Kalkung**

Bei der Auswertung der vegetationskundlichen und bodenchemischen Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass auch die Depositionen, die z. T. zu sehr hohen Stickstoffeinträgen führten, sowie die zu deren Kompensation durchgeführten Kalkungen die Zusammensetzung der Bodenvegetation und die bodenchemischen Kennwerte beeinflusst ha-

ben. Ursprünglich war für die vorliegende Arbeit eine stärkere Konzentration auf Ursache-Wirkungs-Beziehungen hinsichtlich der Oberbodeneigenschaften geplant. Deshalb wurden die meisten Daten so erhoben und strukturiert, dass Verfahren, die es ermöglichen, Einflüsse und Zusammenhänge bestimmter Faktoren zu quantifizieren, z. B. durch Autokorrelationen oder LISREL-Analysen (z. B. WÄLDER et al. 2008), durchführbar sind. Allerdings wurde auf Grund des Depositions- und Kalkungseinflusses im Untersuchungsgebiet und der in dieser Arbeit nachgewiesenen baumartenabhängigen Verteilung des Kalles auf eine starke Verknüpfung und Modellierung der Oberbodeneigenschaften verzichtet. Der heutige N-Eintrag in Waldökosystemen variiert regional erheblich (FEGGER 1994). Er stammt vor allem als Ammoniak aus der Landwirtschaft (HADWIGER-FANGMEIER et al. 1992) und zum anderen als Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) aus industriellen Verbrennungsprozessen sowie dem KfZ-Verkehr. Eine wesentliche Einflussgröße der ökosysteminternen N-Umsetzungsprozesse sind neben veränderten Depositionsverhältnissen eben auch die Kalkungsmaßnahmen. Kalkungen heben den pH-Wert an und führen so zu einer Veränderung der mikrobiellen Aktivität und der Bodenorganismengruppen (MAI und FIEDLER 1978; LANG und BEESE 1985; ZELLES et al. 1990). Die Erhöhung der Nitrifikation nach Kalkungsmaßnahmen ist aus zahlreichen Untersuchungen bekannt (z. B. GIBBS und WERKMANN 1922; TAMM und PETERSON 1969; SEIBT et al. 1977; NÖMMIK 1978; LANG und JAGNOW 1986; LANG et al. 1993). Es ist anzunehmen, dass wegen der hohen aktuellen N-Einträge solche Kalkungseffekte besonders groß sind.

Es ist sicher, dass klare Darstellungen und Erklärungen von Baumarteneffekten durch die erfolgten Kalkungen und auch Veränderungen im Stickstoff-Kreislauf nicht immer eindeutig möglich sind. Möchte man aber Aussagen über Mischungen für bewirtschaftete Wälder im Erzgebirge treffen, so ist es nicht sehr sinnvoll, auf Flächen auszuweichen, die nicht gekalkt sind. Diese wären nicht repräsentativ für die meisten genutzten Forstflächen des Erzgebirges. Die vorliegende Arbeit verfolgt nicht nur einen reinen kausalen Untersuchungsansatz. Es wurden ebenfalls praxisrelevante Argumente dafür gesucht, ob es aus bodenökologischer Sicht empfehlenswert ist, derartige Mischungen anzustreben. Hierfür ist es sinnvoll, Flächen zu untersuchen, die durch Kalkungen und Depositionen beeinflusst sind. Bei den N-Einträgen gibt es für wissenschaftliche Untersuchungen nicht sehr viele Möglichkeiten, diesem Einflussfaktor auszuweichen. Es besteht lediglich die Alternative, Untersuchungsflächen nicht direkt in der Nähe von Punktquellen (z. B. landwirtschaftliche Betriebe und landwirtschaftliche Nutzflächen) anzulegen. Das wurde in der Arbeit berücksichtigt. Trotzdem kann man den N-Einträgen (von ca. 20 bis 30 kg/ha\*a) im Unter-



suchungsgebiet nicht entgehen. Dieser Faktor ist für die Region gegeben. Er kann deshalb nicht ignoriert werden.

Auch das Vorkommen von Sippen des Offenlandes bzw. der Waldlichtungs-Krautfluren in den eigenen Untersuchungen kann nach SCHMIDT (1992 und 2002) und DENNER (2006) auch eine Folge der Kalkung sein. Nach den Befunden von FISCHER (1992) traten durch die Melioration in bodensauren Buchenwäldern höhere Arteninventare, Individuenabundanzen und Deckungsgrade auf. Dabei kamen vor allem nitrophytische Pflanzen neu hinzu. Außerdem erhöhten sich die Licht-, Reaktions- und Stickstoffzahlen deutlich. Auch WENDT und SCHMIDT (2000) wiesen diesen Anstieg für Kiefernwälder nach. Eine Langzeitwirkung der Kalkung auf die Stickstoffzahl in einem Fichtenforst konnten IMMER et al. (1993) allerdings nicht feststellen. SCHMIDT (2002) schildert, dass nach erfolgter Kalkung die Artenanzahl in der Krautschicht, die mittlere Reaktions- und Stickstoffzahl sowie der Anteil der Nichtwaldarten zunehmen. Dabei führte eine Wiederholungskalkung nicht zu einer Verstärkung dieser Veränderungen. Nach FIEDLER und FIEDLER (1961) und REHFUESS (1990) kann die Kalkung zum Anstieg der Keimzahlen von Bakterien und Actinomyceten, dem Absinken der Keimzahl der mikroskopischen Pilze sowie zur Förderung des Regenwurmbesatzes führen (HUHTA 1979). Die Kalkung beeinflusst letztendlich auch den chemischen Charakter der Auflagen (z. B. KREUTZER 1995; LORENZ et al. 2001). In dieser Arbeit sind die kleinräumlichen Unterschiede (z. B. bei der Bodenvegetation und den Oberbodeneigenschaften) deutlich herausgearbeitet worden. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass sich der Kalk unter den Baumarten unterschiedlich verteilt. Vor diesem Hintergrund mag der Verdacht entstehen, dass die gefundenen Baumarteneffekte vorrangig kalkungsbedingt sind. Es gibt aber Anhaltspunkte dafür, dass die Kalkung nicht alle natürlichen Muster überprägt. Erstens treten mit teilweise hoher Artmächtigkeit auch Säurezeiger in der Bodenvegetation auf (z. B. *Deschampsia flexuosa* und *Vaccinium myrtillus*). Zweitens zeigt das PCA-Ordinationsdiagramm der Bodenvegetation, dass vermutlich ein Zusammenspiel anderen Faktoren ausschlaggebender für die Differenziertheit der Bodenvegetation ist und dadurch bedingt auch wiederum für die Oberbodeneigenschaften (vgl. Diskussion oben).

### **Einfluss der Stratifizierung**

Neben der räumlichen Analyse der Transekte war es von Interesse, die Ausprägung der verschiedenen Merkmale in den Zusammenhang mit den Baumarten bzw. der Mischsituation zu bringen (vgl. Kap. 3.1 und 3.2). Zum Stratifizieren wurden die Daten der Kronenab-

lotung über den Transekten verwendet. Dazu bot sich an, alle Transektpunkte unter einer Birke in das Birken-Stratum zu integrieren. Die Zuordnung aller in der Mischsituation befindlichen Punkte erfolgte in ein Stratum Fichte-Birke. Alle Transektpunkte, die in der Reinbestandessituation Fichte lokalisierbar waren, sind zum Stratum *Fichte* zusammengefasst. Die Einteilung hat den Vorteil, dass somit ausreichend Daten für Signifikanztests vorliegen. Aber gerade für den Übergangsbereich von Fichte und Birke machten die Ergebniskapitel deutlich, dass dieses Stratum sehr heterogen ist. Offensichtlich ist es ein Nachteil, der durch die Zusammenfassung von Datenpunkten zu Klassen (Straten) auftritt. Gerade die Übergangszonen erhöhen die Heterogenität (z. B. Oberbodeneigenschaften, Bodenvegetation usw.) innerhalb der Bestände und geben Anlass für zukünftige Forschung.

### **Einfluss der verwendeten Methodik am Beispiel des Streuzersetzungsexperiments**

Auch die Wahl der Methodik beeinflusst maßgeblich die Ergebnisse der Experimente. Um beispielsweise die Zersetzung der Streu zu betrachten, muss man sich künstlicher Systeme bedienen, die aber nie hundertprozentig die natürlichen Prozesse widerspiegeln. Hier ist vor allem die Verwendung von Netzbeuteln bei der experimentellen Untersuchung des Streuabbaus zu nennen, die schon seit einigen Jahrzehnten praktiziert wird (z. B. BOCK und GILBERT 1957; GOSZ et al. 1973; BERG und STAAF 1980; MELILLO et al. 1982; McCLAUGHERTY et al. 1985). Solche Netzbeutel enthalten eine festgelegte eingewogene Menge an Streu und sind auf bzw. im Boden für eine vorgegebene Zeit exponiert. Mikroorganismen besiedeln die Streu durch die Öffnungen des Netzbeutels, sind meist aber auch schon - falls die Proben nicht sterilisiert werden - auf der Streu vorhanden. Durch die Wahl einer relativ groben Maschenweite von 1 mm bleibt die Aktivität der Bodenmesofauna gewährleistet (RASPE et al. 1996). Die mit der Litter-Bag-Methode ermittelte Abbaugeschwindigkeit ist immer etwas niedriger als die Abbaugeschwindigkeit der frei liegenden Streu, da die im Beutel befindliche Substanz keinen vollkommenen Kontakt mit dem Boden hat und in der Regel auch nur ein Teil der Zersetzergemeinschaft am Abbau beteiligt ist. Die im Beutel zu einer Schicht verklebte organische Masse besitzt in der Regel eine höhere Feuchtigkeit und ist weniger durchlüftet. All diese Umstände können die Abbaugeschwindigkeit der natürlichen Substrate verlangsamen (DUNGER und FIEDLER 1997). Man sollte bei der Anwendung von Litter-Bags berücksichtigen, dass der systematische Fehler dieser Methode zu Fehleinschätzungen bei der Zersetzung von Streu auf lange Sicht führen kann (KURZ-BESSON et al. 2005). Die Expositionsdauer entspricht in den meisten Untersuchungen nicht dem kompletten Zersetzungszyklus der

Streu. HEIM und FREY (2004) stellten in ihren Streuzersetzungsexperimenten fest, dass im ersten Jahr ein großer Anteil des Massenverlustes im Winter stattfindet. Dieser Trend fand sich auch in den eigenen Befunden und ist damit zu erklären, dass der erste Winter in den Zeitraum des initialen Streuabbaus fällt. Beim Streuabbau ist ein exponentieller Abfall zu beobachten. Das Experiment musste aber leider vorzeitig beendet werden. Aussagen für eine Vegetationsperiode waren dennoch möglich. Bis zum heutigen Tag beschäftigen sich die meisten Arbeiten zur Streuzersetzung von Baumarten lediglich mit der Blatt- bzw. Nadelstreu (z. B. GRUSELLE und BAUHUS 2005; CROW et al. 2009). In Anlehnung an dieses Vorgehen wurden auch die eigenen Litter-Bag-Experimente konzipiert. Die Untersuchungen mit den Streufängen haben aber gezeigt, dass damit für die Baumart Birke ein großer Anteil an produzierter organischer Trockenmasse nicht aus Blättern besteht, sondern aus Birkensamenzäpfchen. Diese Baumart steckt in ihrer Pionierfunktion sehr viel Energie in die Diasporenproduktion (z. B. GIMINGHAM 1984; AAS 2000; SCHIRMER 2000; HUTH 2009) und produziert demnach einen nicht unerheblichen Trockenmasseanteil an Birkensamenzäpfchen. Wichtig für die in der Arbeit behandelte Fragestellung wären also zukünftig Zersetzungsexperimente, die Zweige, Borken, Zapfen, Knospenschuppen usw. einbeziehen sowie die Streu von der Bodenvegetation (z. B. NILSSON et al. 1999) enthalten. Dieser Ansatz ist aber gewiss sehr schwer umsetzbar. Neben den genannten Kritikpunkten sollte auch die Komplexität der Streuzersetzung nicht unterschätzt werden. SILFVER et al. (2007) machten beispielsweise darauf aufmerksam, dass es sogar Streuzersetzungsunterschiede der Birken bei den einzelnen Genotypen der Birken gibt. Doch trotz einer Reihe methodischer Unzulänglichkeiten hat sich das Konzept der Litter-Bags als ausgesprochen flexibel, informativ und zukunftsweisend gezeigt (WOLTERS 1996). Mit dieser Methode ist es möglich, kontrollierte Rahmenbedingungen zu schaffen. So finden Litter-Bags für aktuelle Fragestellungen zur Dynamik der Streuzersetzung immer wieder Anwendung (z. B. KANEKO und SALAMANCA 1999; NILSSON et al. 1999; LORENZ et al. 2000 und 2004; GRUSELLE und BAUHUS 2005; DEARDEN et al. 2006; FRIEDEL et al. 2006; LUIZÃO et al. 2007).

### **Einfluss der Durchwurzelung**

Bei der Berechenbarkeit bzw. Modellierbarkeit der Einzelbaumeffekte muss zwischen den primären und sekundären Variablen stark unterschieden werden (siehe dazu Kap. 3.2). Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass z. B. die Laubmassenverteilung im Bestand sehr gut zu modellieren ist. Das ist ein wichtiger Prozess, um später die komplexen Effekte (wie z. B. Oberbodeneigenschaften oder Bodenvegetation) modellmäßig zu beschreiben.

Die Oberbodeneigenschaften von Beständen zukünftig komplett zu erklären, macht es unumgänglich, diese mit Untersuchungen zu den Wurzelsystemen der beiden Baumarten zu koppeln. Aussagen aus Wurzelmodellen können dabei helfen, die räumlichen Muster der chemischen und physikalischen Oberbodeneigenschaften besser zu verstehen. Beispielsweise bestätigten AMMER und WAGNER (2002) mit ihrer Modellierung, dass bei der vertikalen Verteilung der Fichtenfeinwurzeln eine Konzentration von Feinwurzeln im oberen Mineralboden (0-10 cm) zu beobachten ist. Die Ergebnisse decken sich nach AMMER und WAGNER (2002) mit früheren Studien von KALELA (1950), MEYER (1967), MURACH et al. (1993) sowie WITTKOPF (1995). Die maximale Ausdehnung der Fichtenwurzeln lag bei einem BHD von 30 cm und einem Alter von 75 Jahren bei 9-15 m. Auch NIELSEN und MACKENTHUN (1991), PUHE (1994), MÜLLER und WAGNER (2003) sowie AMMER und WAGNER (2005) belegen für die Fichte eine Akkumulation der Feinwurzelichten in den oberflächennahen Humusbereichen in Altbeständen. Ursachen dafür liegen vor allem darin begründet, dass die Tiefendurchwurzelung der Altbäume durch ungünstige Standortbedingungen (Luftmangel infolge von Verdichtung und periodischer und permanenter Staunässe) gehemmt sein kann, ein interspezifischer Konkurrenzdruck besteht (HARMER und ROBERTSON 2003, DEHLIN et al. 2004), und dass in der Auflage im Vergleich zum Mineralboden eine höhere Verfügbarkeit der Nährstoffe im Oberboden gerade auf schlechter nährstoffversorgten Standorten (RASPE 1992) existiert. Für die in Fichtenbestände eingemischte Birke liegen bis dato noch keine überzeugenden veröffentlichten Wurzelmodelle vor. BEßLER (2003) beschreibt jedoch für die in Kiefer eingemischte Birke, dass anders als bei der Kiefer die meisten Birkenfeinwurzeln im obersten Dezimeter des Mineralbodens auftreten und nicht in der Humusauflage. Auch LEUSCHNER (1994) findet nur 26 % der Birkenfeinwurzeln in der Humusauflage (zit. n. BEßLER 2003). Aus einem vom BHD abhängigen Ausbreitungsmodell leitet BEßLER (2003) ab, dass sich der größte Anteil der Feinwurzelbiomasse etwa am Kronenrand befindet, aber ein beträchtlicher Anteil auch darüber hinaus. Nach KÖSTLER et al. (1968) ist für die Birke ein Herzwurzelsystem mit starker Verzweigungsintensität typisch, das sich bereits in frühester Jugend ausbildet. Mit ihrem Wurzelwerk kann sich die Birke relativ gut den jeweiligen Standortverhältnissen anpassen. Dadurch können auch dichte Böden relativ gut durchwurzelt werden. Auf trockenen Sandstandorten vermag die Durchwurzelung bis 2,5 m tief zu reichen (KÖSTLER et al. 1968). Es sei darauf hingewiesen, dass natürlich im vorliegenden Fall die durchgeführte Kalkung auch das Wurzelwachstum beeinflusst und es dadurch möglich ist, dass sich in gekalkten Beständen andere Ergebnisse (z. B. Feinwurzelichten) zeigen würden als in ungekalkten (z. B. PERSSON und AHLSTRÖM 1990/1991). Sehr stark ist aber zu vermuten, dass Birke und Fichte, bedingt

durch Unterschiede in ihren Wurzelsystemen, die Oberbodeneigenschaften sowohl physikalisch als auch chemisch differenziert beeinflussen.

### **Einfluss der Strahlung**

Bei der Untersuchung der photosynthetisch aktiven Strahlung in den eigenen Forschungen wurden nur Strahlungskarten (Abb. 24b und Abb. 25b) erzeugt, die vor allem einen Gesamteindruck der photosynthetisch aktiven Strahlung des gesamten Bestandes vermitteln und Vergleiche zwischen der Fichten-Birkenfläche und der reinen Fichten-Fläche anstellen. Versuche, aus Ergebnissen der Fisheye-Methode Strahlungsmodelle für Einzelbäume abzuleiten, wurden von WÄLDER et al. (2009) unternommen. Sicherlich liefern derartige Ansätze zukünftig repräsentativere Modellierungsergebnisse für stamminahe Probepunkte als die der eigenen Untersuchungen. Dabei können durch den Einzelbaum bedingte Anisotropien der Strahlungsverteilung berücksichtigt werden.

In den vorliegenden Befunden ist der Deckungsgrad der Moosschicht in der Mischsituation höher als in der reinen Fichtenfläche. Dabei kam es teilweise auch dann zu hohen Deckungsgraden der Moosschicht, wenn die Krautschicht ebenfalls gut entwickelt war. Erklären könnte man diesen Befund damit, dass die Moose ihr physiologisches Optimum zu Zeitpunkten erlangen, an denen die krautigen Pflanzen noch nicht bzw. nicht mehr aktiv sind (FRAHM 1998 zit. n. TISCHER 2009). Bei ausreichender Verfügbarkeit der Ressourcen ist aber auch eine Parallelentwicklung beider Schichten denkbar. SAETRE et al. (1997) fanden allerdings in Fichtenbeständen eine deutlich heterogenere und höhere Deckung der Moosschicht als in Mischbeständen. Ihrer Meinung nach liegt die Ursache darin, dass die Moose im Allgemeinen noch bei geringem Strahlungsangebot Photosynthese betreiben können. Außerdem sei das Risiko der Austrocknung unter Fichte geringer.

### **Einfluss der Synergien**

Würden Strahlungsdaten neben Wurzel-, Wasserhaushalts-, Streu-, Bodenvegetationsdaten usw. in Bezug auf die Daten der Oberbodeneigenschaften zukünftig gemeinsam vorliegen, dann wäre es möglich, tatsächliche Synergien oder Antagonismen zwischen den einzelnen primären und sekundären Variablen herzuleiten. Aktuell sind wir aber noch nicht in der Lage, die grundlegenden Prozesse (aufgrund ihrer Komplexität), wie z. B. die räumliche Feuchteverteilung, exakt zu modellieren. Betrachtet man nur allein die Feuchteverteilung im Oberboden, ist diese Variable schon bei der Messung und Auswertung so

---

komplex, dass sie in vielen Arbeiten, insbesondere Dissertationen, als eigenes Thema behandelt wird. Andere Veröffentlichungen beschäftigen sich dann wieder ausschließlich mit der Bodenvegetation. Gegen diese Spezialisierung der Forschung ist aus Sicht der Genauigkeit auch nichts einzuwenden. Trotzdem ist es durch diese sektorale Herangehensweise bis heute unmöglich, eine Systemfunktion darzustellen, da derartige Arbeiten meistens nur für das Herleiten einzelner Prozessmodelle und nicht für eine Erklärung von komplexen Ursache-Wirkungsbeziehungen in Bezug auf die chemischen und physikalischen Oberbodeneigenschaften verwendet werden. Einerseits ist es völlig klar, dass wir solch eine Spezialisierung in der Forschung brauchen, um grundlegende Prozesse zu erklären. Andererseits ist streng genommen z. B. die Feuchteverteilung im Oberboden in einem Waldbestand nicht ohne die Strahlung, die eingetragene Streu, die Wurzelverteilung usw. zu prognostizieren. Was wir zukünftig brauchen, um die Oberbodeneigenschaften in ihrer kleinräumlichen Variabilität kausal zu verstehen, sind Forschungsansätze, die die gesamte Grundlagenforschung zu den einzelnen Variablen bündeln, ohne mit dem Vorwurf der Oberflächlichkeit oder zu großen Komplexität abgelehnt zu werden. Auch zukünftig wird das eine Einzelstudie nicht leisten können.

**Fazit:**

*Bei der dritten Hypothese hat sich in der vorliegenden Arbeit die Messbarkeit der Einzelbaumeffekte teilweise bestätigt. Im Hinblick auf die Berechenbarkeit muss aber klar gesagt werden, dass zwar die Streuverteilung berechenbar ist; doch für die Untersuchungsfläche ist eine konkrete Berechenbarkeit von Einzelbaumeffekten auf die Oberbodeneigenschaften nicht realisierbar. Die Gründe dafür sind vor allem die nicht herausrechenbaren Einflüsse der Kalkungen und Depositionen.*

## **6. Waldbauliche Bewertung und Schlussfolgerungen**

Die Arbeit fand in einem Bestand statt, in dem Birken vor allem einzelbaumweise in einen Fichtenbestand eingemischt sind. Diese Birken führen zu kleinräumlichen Veränderungen der Humusmorphologie, der chemischen Oberbodeneigenschaften, der mikrobiellen Aktivität im Oberboden, der Bodenvegetation sowie der Strahlung, die den Boden erreicht. Die Befunde der Arbeit deuten daraufhin, dass schon einzelbaumweise eingemischte Birken in Fichtenbeständen einen positiven Einfluss auf die Oberbodeneigenschaften ausüben. Allerdings überdauert bis heute in Deutschland die vor allem aus dem 18. und 19. Jahrhundert stammende Meinung, dass in Fichtenbeständen die Birke nicht geduldet werden sollte. Viele Forstkoryphäen (z. B. BURCKHARDT 1855, GAYER 1886) äußerten sich über die Birke negativ, u. a. auf Grund ihrer bis heute kritisch diskutierten peitschenden Wirkung (z. B. FAHLVIK et al. 2011). Nicht zuletzt das Erbe früherer Forstgenerationen ist es, dass die Birke bis heute bei vielen Forstpraktikern und Waldbesitzern als „Unkraut“ bzw. „Unholz“ gilt. Auch wenn die Vorteile der Birke nicht erst in den letzten Jahren hervorgehoben wurden, ändert sich am schlechten Image der Birke in Deutschland nur langsam etwas. Die Seltenheit von Birken in den über 40 Jahre alten Beständen, die es auch so schwierig gemacht hat, eine geeignete Untersuchungsfläche zu finden, ist also eine Folge der üblichen Durchforstungspraxis, bei der die Birken oft vollständig entfernt wurden und werden. Trotzdem ist ein Umdenken erkennbar (SPERBER 2000). Mit Blick auf den heutigen Kenntnisstand und die Ergebnisse dieser Arbeit, ist eine Abkehr von der z. T. bis heute praktizierten Bestandespflege, bei der alle Birken üblicherweise kostenintensiv entfernt werden, wünschenswert. Um einige Effekte dieser Baumart in Fichtenbeständen zu quantifizieren, wurde in der Arbeit eine Auswahl von Untersuchungen durchgeführt, die aber noch keine endgültige Einschätzung der standortsökologischen Effekte der Birke erlaubt. Betrachtet man beispielsweise die Biodiversität gibt es eine Fülle von Gruppen (z. B. Tierarten, Pilzarten, Pflanzenarten usw.), die nicht Bestandteil der Arbeit waren. Deshalb werden in diesem Kapitel auch Aspekte diskutiert, die hier nicht untersucht wurden, aber ohne die eine waldbauliche Einschätzung der Birke als Mischbaumart in Fichtenbeständen nicht möglich ist. Dabei finden sich viele Arbeiten aus Nordeuropa, da dort Mischbestände aus Fichte und Birke eine viel größere Bedeutung haben und häufiger vorkommen. Im Folgenden werden Vor- und Nachteile von Birkeneinmischungen in Fichtenbeständen anhand der vorliegenden Untersuchungen sowie der internationalen Literatur diskutiert und daraus Konsequenzen für den Waldbau gezogen.

### **Wachstum der Bestände**

Gegenstand dieses Unterkapitels sind die Wechselwirkungen der beiden Baumarten bezüglich ihres Wachstums. Zwar war das nicht Bestandteil der eigenen Forschungen, doch ist es unerlässlich für eine waldbauliche Einschätzung der Mischung. FIRVOLD und FRANK (2002) fanden heraus, dass das Wachstum von Fichte in jungen Mischbeständen aus gleichaltriger Fichte und Birke (Birke < 17m, aus Naturverjüngung) höher war als in Reinbeständen. In älteren Beständen gab es keine signifikanten Unterschiede zum Reinbestand. MIELIKÄINEN (1985) entdeckte, dass aus Mischungen von Sandbirke und Gemeiner Fichte ein größerer Ertrag erzielt werden konnte als aus Fichtenreinbeständen. Dieser höhere Ertrag im Vergleich zu Fichtenreinbeständen galt, wenn *Picea abies* und *Betula pendula* in einem Verhältnis von 75:25 % gemischt waren. MÅRD (1997b) sowie FRIVOLD und KOLSTRÖM (1999) zeigten für Schweden und Finnland, dass die Birke bis zu einem Alter von 35-50 Jahren einen größeren Volumenzuwachs als die Fichte hat, aber später von der Fichte überholt wird. Vor allem für zweischichtige Bestände aus Fichte und Birke existieren Untersuchungen über das Wachstum, die Entwicklung und die Struktur (z. B. GNOJEK 1992; THAM 1994; MÅRD 1996 und 1997a; BERGQVIST 1999a und b; JOHANSSON 2001) und empirische Modelle zur Produktivität und Ökonomie (z. B. VALKONEN und VALSTA 2001). THAM (1988) wies durch Modelstudien nach, dass eine Mischung von 600 und 800 Birkenstämmen als Schirm und darunter 2000-3000 Gemeinen Fichten pro Hektar zu einem höheren totalen Ertrag führt, als ein vergleichsweiser Fichtenbestand ohne Birkenschirm (dieser wurde im Alter von 25 bis 30 Jahren entfernt). KLANG und EKÖ (1999) ermittelten bei ihren Untersuchungen, dass bei Fichten (16 bis 32 Jahre nach der Pflanzung) unter Birkenschirmen, die Fichten generell kleiner waren und dünnere Stämme hatten, als Fichten ohne Schirm. Außerdem hatten die beschirmten Fichten dünnere Zweige, eine niedrigere durchschnittliche Jahrringbreite und eine geringere Dichte von Holzfehlern. Der Ertrag der beschirmten Fichten war dabei geringer, als der von frei wachsenden Fichten. Betrachtet man allerdings wie bei THAM (1988 und 1994) und MÅRD (1996) den Gesamtertrag (also indem man die Schirmbäume mit einrechnet) zeigt sich ein höherer Wert als für die Flächen ohne Schirm. Die Birkenschirme schützen die jungen Fichtenpflanzen vor Temperaturextremen wie Frost (LUNDMARK und HÄLLGREN 1987; ÖRLANDER 1993; ÖRLANDER und KARLSSON 2000) und intensiver Strahlung (LUNDMARK und HÄLLGREN 1987). Der höhere Gesamtertrag ist wahrscheinlich ein Effekt der unterschiedlichen Wachstumsmuster der langsam startenden Gemeinen Fichte mit der schnell wachsenden jungen Birke. In der Summe war die



Gesamt-Anfangsgrundfläche höher für die Schirmflächen und führte so zu einer hohen Volumenproduktion (KLANG und EKÖ 1999).

Aus waldwachstumskundlicher Sicht sprechen also mehrere Fakten für eine Einmischung von Birke in Fichtenbestände. Es müssen aber noch Kriterien wie optimale Mischungsform und Mischungsgrad/-anteil geklärt werden. PRETZSCH (2009) entwickelte ein schematisches Modell, in dem er die Produktivität zweier gemischter Baumarten in Abhängigkeit vom Mischungsanteil beschreibt (Abb. 80). Auf die Mischungsform und den Mischungsgrad wird im übernächsten Subkapitel intensiv eingegangen.

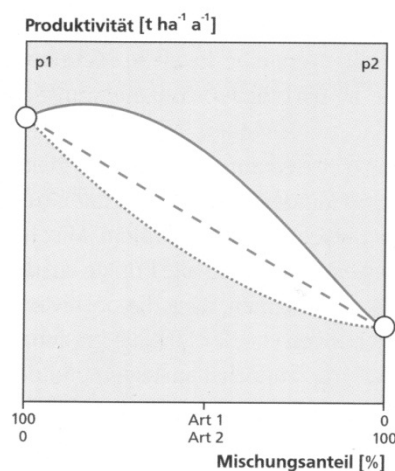


Abb. 80: Hypothesen über den Effekt der Mischung zweier Arten auf ihre Produktivität in schematischer Darstellung aus PRETZSCH (2009); auf der linken und rechten y-Achse ist die Produktivität der Art 1 bzw. 2 (p1, p2) im Reinbestand angegeben. Die x-Achse gibt den Mischungsanteil an.

Liegt die Produktivität eines Mischbestandes auf der geraden Verbindungslinie (gestrichelt), so handelt es sich um einen neutralen Ersatzeffekt, liegt die Produktivität auf der von unten gesehen konkaven Linie (durchgezogen), so zeigt das einen Mehrzuwachs gegenüber dem Reinbestand an.

Liegt die Produktivität dagegen auf der von unten gesehenen konvexen Linie (punktirt), so war der Zuwachs gemindert.

Weiterhin muss zukünftig der Mehr- oder Minderzuwachs von Fichten-Birken-Mischbeständen abhängig vom Alter und der Bewirtschaftung untersucht werden. Denn nicht nur der Mischungsanteil ist entscheidend für die Produktivität des Bestandes, sondern auch das Entwicklungsstadium. Wie es vor allem die skandinavischen Untersuchungen zeigen (siehe oben), gibt es den Erfahrungswert, dass die Gesamtvolumenproduktion von Fichten-Birkenmischbeständen in bestimmten Entwicklungsstufen höher ist als bei den Reinbeständen dieser beiden Baumarten. Der höhere Gesamtertrag resultiert wahrscheinlich aus den unterschiedlichen Wachstumsmustern der langsam startenden Gemeinen Fichte mit der schnell wachsenden jungen Birke. Daran wird deutlich, dass das von PRETZSCH (2009) verwendete Modell sicherlich in unterschiedlichen Entwicklungs-

phasen des Mischbestandes zu unterschiedlichen Ergebnisse führt. Es wäre zu vermuten, dass Birke und Fichte in Mischung altersabhängig, bewirtschaftungsabhängig und einzeln nach den Baumarten betrachtet mal einen Mehr- und mal einen Minderzuwachs erbringen. Geht es also um die Frage, ob man eine Mischung von Fichten und Birken unter dem Aspekt der Produktivität empfehlen kann, müssen die Produktionsziele, die betrachteten Produktionszeiträume sowie die waldbauliche Behandlung des Bestandes intensiv analysiert werden.

### **Zukünftiges Klima**

Für einen Forstbetrieb ist die Produktivität eines Bestandes wohl das entscheidende Kriterium, um sich für oder gegen eine derartige Mischung zu entscheiden. Heute fließen aber immer mehr Überlegungen in die waldbaulichen Planungen dazu ein, dass nicht nur unvorhersehbare Entwicklungen im gesellschaftlich-technischen Bereich während der langen forstlichen Produktionszeiten Unsicherheit hervorrufen, sondern auch unvorhersehbare Änderungen von Standortsfaktoren, vor allem des Klimas (v. LÜPKE 2004). Zukünftig ist es demzufolge sinnvoll, Mischwälder aus Baumarten zu bilden, die unterschiedliche ökologische Eigenschaften und Funktionen aufweisen. Dazu formulierte v. LÜPKE (2004) einige Gedanken für verschiedene Baumarten. Mischwälder aus Fichte und Birke erfüllen diese Anforderung aus den folgenden Gründen sehr klar: Die Birke gehört zu den Baumarten, deren Anpassungsfähigkeit an zu erwartende größere Störungen als gut bezeichnet werden kann. Sie hat beispielsweise eine breite ökologische Amplitude (klima- und bodenvag, typischer Ubiquist<sup>3</sup>), kurze Produktionszeiten und schnelle Generationsfolgen mit früh beginnender, häufiger und ergiebiger Fruktifikation sowie eine relativ hohe genetische Vielfalt (z. B. ASPELMEIER und LEUSCHNER 2004 und 2006; SILFVER et al. 2009) und kann größere Freiflächen auch außerhalb ihres unmittelbaren Einflussbereiches rasch besiedeln (effektive Samenverbreitung durch Wind). Nach BEDBUR et al. (2010) verfügt die Birke aufgrund ihrer Rückkehr nach extremen Klimaperioden (Eis- und Vorwärmezeiten) über Anpassungs-Mechanismen, die es ihr ermöglichen, mit sehr vielen Extremsituationen zurechtzukommen (z. B. vorzeitiger Blattabwurf in trockenen Sommern, Verschließen der Lentizellen, Erhöhung der Frosthärte bei extrem niedrigen Temperaturen) sowie eine geringe Anfälligkeit gegenüber biotischen Schadfaktoren. Als Pionierbaumart (z. B. STÄDTLER 1998; AAS 2000; SCHIRMER 2000; HUTH und WAGNER

---

<sup>3</sup> Ubiquist = nicht an ein bestimmtes Biotop gebundene Art, überall verbreitet, in verschiedenen Lebensräumen vorkommend.

2006; HUTH 2009) ist ihr aber auch eigen, dass sie ein vergleichsweise kurzes Lebensalter und eine geringe Konkurrenzfähigkeit (r-Strategie) aufweist (z. B. GIMINGHAM 1984; ATKINSON 1992). Mit ihren Eigenschaften einer Pionierbaumart diene die Birke bisher überwiegend als Vorwaldbaumart (z. B. HEGER 1952; FIEDLER 1962a, b und c; BERGMANN 1993; UNSELD et al. 2010). Hinsichtlich des Klimawandels scheint es aber angebracht, ihre zukünftige Rolle weiter zu fassen (BEDBUR et al. 2010). Nach den letztgenannten Autoren ist die Einbringung von Baumarten, die vergleichsweise kurzlebig und anspruchslos sind und durch ihre Reproduktionseigenschaften gute Voraussetzungen zur genetischen Anpassung besitzen, eine Option der Forstwirtschaft, sich für einen Klimawandel zu wappnen. Bei Einmischung von Sandbirke in Bestände besteht eine Naturverjüngungsoption, die bei katastrophalen Ereignissen zur Sicherung der Betriebe und der Waldeigenschaft dienen kann (WAGNER 2008). In ihrem Review arbeiteten KNOKE et al. (2008) heraus, dass es bei ökonomischen Analysen durchaus sinnvoll ist, die Risikoscheu gegenüber Monokulturen zu akzeptieren und die Risiken in die ökonomischen Betrachtungen zu integrieren. Bei diesem Vorgehen können Mischbestände durchaus auch ökonomisch gesehen erstrebenswert sein.

Dagegen gehört die Fichte zu den Baumarten, denen eher eine schlechte Anpassungsfähigkeit gegen Störungen bescheinigt wird. Vor allem gegen Wassermangel ist sie empfindlich. Sie besitzt eine hohe Anfälligkeit gegen einige abiotische und biotische Störungsfaktoren (z. B. Borkenkäferbefall) sowie gegenüber Stürmen und Waldbränden. Jedoch ist eine hohe Besiedlungsfähigkeit von Freiflächen gegeben (v. LÜPKE 2004). So empfiehlt u. a. WAGNER (2008), den Anbau klimasensitiver Baumarten (wie der Fichte) auf „sichere Standorte“ zu beschränken. Außerdem hebt er die Bedeutung der Waldpflege mit Blick auf die Kronenpflege (rechtzeitige und intensive Hochdurchforstung) hervor, um Blüh- und Fruktifikationsfähigkeit, Zuwachs und Sturmstabilität zu verbessern.

Zwar ist die Birke besser an größere Störungen angepasst, aber zum einen fehlen ihr die Ertragsstärke der Fichte, und zum anderen wäre auch zu berücksichtigen, dass eine Klimaänderung möglicherweise nicht so große Störungen verursacht (v. LÜPKE 2004). Weil Art und Ausmaß einer Klimaänderung nicht hinreichend genau vorausgesagt werden können, muss sich die Forstwirtschaft einerseits auf die vorausgesagte Klimaänderung einstellen, andererseits darf sie aber auch keine weittragenden Entscheidungen treffen, die im Falle des Nichteintreffens der Klimaänderung erhebliche Nachteile zur Folge hätten (THOMASIUS 1991). Ziel der Forstwirtschaft muss eine Erhöhung der Störungsresistenz und Resilienz sein (KATZENSTEINER 2008).

### **Mischungsform und Mischungsgrad**

Da es sich bei Birke und Fichte um eine sehr spannungsreiche Mischung handelt, erfordern bewirtschaftete Wälder aus Fichte und Birke auch spezifische Pflege und Erntemaßnahmen. Derartige Mischungen können sehr vielseitig sein. Je konkurrenzschwächer eine Baumart ist, in umso größeren, in sich reinen Mischungseinheiten sollte sie im Bestand angeordnet werden, um die Kontaktzonen der unterschiedlichen Baumarten zu minimieren (v. LÜPKE 2004). Zur Sicherung zufriedenstellender Holzqualitäten werden für Laubbäume in Nadelholzbeständen deshalb öfter eher trupp-, gruppen- oder horstweise Mischungen anstatt einzelbaumweise Mischungen empfohlen (z. B. v. WYL et al. 2003; GREB 2008). Als weiteres Kriterium dafür, dass eher Gruppenmischungen zu empfehlen sind, nennt WAGNER (2008) die horizontale Laubverfrachtung, die von Einzelbäumen ausgehend, meistens nicht über 20 m reicht (trifft auch für die vorliegende Arbeit zu). Nur in dem Bereich von 10 m kann die Birke zu einer besseren Umsetzung der Streu beitragen. Wichtig ist zu gewährleisten, dass die Einflusszonen der verschiedenen Baumarten trotzdem möglichst den gesamten Bestand abdecken und nicht nur auf wenige größere Mischungseinheiten beschränkt bleiben. UTSCHICK und AMMER (2003) bieten als Lösung an, dass zur Vermeidung nachhaltiger, tiefgründiger Bodenversauerung die Laubholzinseln im Sinne eines „Fruchtwechsels“ wandern, sodass nach etwa drei Bestandesgenerationen alle „Nadelwaldeinheiten“ einmal Laubwaldbestockung getragen haben. Für die hierfür notwendige Flexibilität sollten flächig Samenbäume sichergestellt werden.

Um eine konkurrenzschwache Baumart wie die Birke zu fördern, kommt auch eine ungleichaltrige Mischung in Frage. Einen dieser Fälle stellen Mischbestände dar, in denen die Birke als Schirm dient. Da die Birke zu den sehr lichtdurchlässigen Baumarten gehört, ist es für die Fichte (obwohl sie nur eine Halbschattbaumart ist und keine Schattbaumart) möglich, unter Birke zu wachsen. Einzelbaumweise Beimischungen sind im Falle einer eindeutig vorwüchsigen Baumart gegenüber Trupp- oder Gruppenmischung zu empfehlen, um bei der Ernte dieser Baumart im verbleibenden Bestand keine allzu großen Lücken zu hinterlassen (WAGNER 2008). Dies gilt auch für Zeitmischungen, in denen die Fichte eindeutig vorwüchsig ist und die Bestockung langfristig in andere Baumarten überführt werden soll.

Bei dem Untersuchungsbestand dieser Arbeit handelt es sich nicht um einen Standort, der für die Wertholzproduktion von Birke dienen kann. Für Standorte, die aber die Wertholz-

option ermöglichen, empfiehlt RITTERSHOFER (2000) eine Zeitmischung von Birke in beschränkter Anzahl und auf Fehlstellen. Er weist darauf hin, dass die Anzahl der Birken i. d. R. auf 20 (-30) je ha begrenzt bleiben sollte, damit später keine bleibenden Lücken entstehen. Die Schlussfolgerung, dass die Anzahl der Birken i. d. R. auf 20 (-30) je ha begrenzt sein soll, ist aber in dieser Formulierung unabhängig von dem Ziel der Wertholz- oder Massenh Holzgewinnung gezogen. Sie kann aber für beide Zielsetzungen angewendet werden, da sie sich nur auf das Verhindern von bleibenden Lücken bezieht. Sollten bleibende Lücken unerwünscht sein (z. B. bei drohender Vergrasung), wäre diese Zahl festzuhalten.

Auch in der bodenkundlichen Forschung finden sich einige Anhaltspunkte, aus denen Mischungsanteile abgeleitet werden können. NOIRFALISE (1967) beschreibt einen auffälligen Rückgang der Anzahl an Regenwürmern unter Fichte. Nach SAETRE (1998) benötigt die von ihm untersuchte Regenwurmart (*Aporrectodea caliginosa* Savigny) für ihre Aktivität wenigstens 25 % Birkenstreuanteil. Einige Arbeiten verweisen darauf, dass Regenwürmer einen Mindest-pH-Wert von 3,5 brauchen (z. B. AMMER und MAKESCHIN 1994; GEISSEN et al. 2007), wobei aber jede Regenwurmart unterschiedliche pH-Wert-Bereiche toleriert. Neben den Regenwürmern spielen jedoch auch eine Reihe anderer Zersetzer eine wichtige Rolle (KIENZLER et al. 1986; WEIDEMANN und SAUERMANN 1986). Dazu zählen u. a. Pilze und Bakterien (z. B. PRIHA et al. 2001).

Die eigenen Befunde aus dem Litter-Bag-Experiment deuten darauf hin, dass sich das höhere Mischungsverhältnis der Birken- und Fichtenstreu von 5:1 bei der Zersetzung der Birkenstreu als günstiger erweist als eine Mischung von 3:2. Bei den Nadeln sieht es allerdings anders aus. Hier wiesen die reinen Nadel-Litter-Bags bei der Zersetzung der Fichtennadeln die höchsten Trockenmassenverluste auf. Die Beimischung der Birkenstreu erzielte keine positiven Effekte. Allerdings wirkte sich die Lage unter der Birkenkrone positiv auf die Trockenmassenverluste der Fichtennadeln aus. Da das Streuzersetzungsexperiment durch den Schneebruch nur 506 Tage durchgeführt werden konnte, wird lediglich die erste Phase der Streuzersetzung erfasst. So ist es durchaus möglich, dass sich bei einer längeren Versuchsdauer andere Trends gezeigt hätten. Außerdem spiegeln Litter-Bag-Experimente nicht unbedingt die Zersetzungsbedingungen im Bestand wider (vgl. Kap. 5.3).

Auch beim Ertrag finden sich ähnliche Empfehlungen zu Mischungsanteilen. Bei 25 % Einmischung von Birke in Fichte hatte MIELIKÄINEN (1985), wie oben erwähnt, bezüglich

des Gesamtertrages eine Verbesserung im Vergleich zum Reinbestand festgestellt. Richtet man sich nach der Aussage von MIELIKÄINEN (1985) und FIEDLER (1990), wären bei 500 Bäumen pro Hektar 125 Birken notwendig, um diese Mindesteinsmischung zu garantieren.

Die von RITTERSHOFER (2000) empfohlene Anzahl der Birken weicht von den eigenen Ergebnissen keineswegs in starkem Maße ab. Dabei konnte, wie im Kap. 4.3 ausführlich beschrieben, herausgefunden werden, dass eine Birke mit einem BHD von ca. 38 cm eine mittlere Ausbreitung der Laubstreu von 10 m aufweist. In diesem Bereich kommt also der größte Anteil von Birkenstreu auf den Boden. Zwar reicht die Streu bis maximal 20 m, aber über 10 m treten keine größeren Mengen an Birkenstreu mehr auf. Es ist durchaus möglich, dass die Streu, nachdem sie auf den Boden gefallen ist, verweht werden kann. Allerdings waren die gemessenen Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe (vgl. Kap. 4.3) schon sehr gering. So ist davon auszugehen, dass sie in Bodennähe u. a. aufgrund der Bodenvegetation noch geringer sind. Größere Ansammlungen von Blättern an rauerer Strukturen konnten nicht beobachtet werden. Aber natürlich kann es gerade bei höheren Windgeschwindigkeiten (z. B. Sturm) passieren, dass die Streu nicht den in dieser Arbeit modellierten Verteilungsmustern folgt, sondern sich dann anders verteilt und von rauerer Strukturen aufgefangen wird. Dies hätte u. a. auch Einfluss auf die Muster der Oberbodeneigenschaften. Beobachtet werden konnte aber, dass vor allem durch den Schnee im Winterhalbjahr die Streu am Boden festgedrückt und auch dadurch fixiert wurde. Im Untersuchungszeitraum waren allerdings keine größeren Verwehungen sichtbar, so dass die Ergebnisse des Streuverteilungsexperimentes für die weitere Diskussion herangezogen werden. Mit dem von SAETRE (1998) empfohlen 25 % Birkenstreuanteil wurde ausgerechnet, bis zu welchem Abstand in den eigenen Ergebnissen mindestens 25 % Birkenbeimischung garantiert sind. Hier zeigen sich ebenfalls die 10 m. Auch bei den Messungen der Oberbodeneigenschaften konnten keine Verbesserungen an Punkten, die mehr als 10 m vom Birkenstamm entfernt waren, festgestellt werden.

Um einen Mindest-Birkenstreuanteil von 25 % im gesamten Bestand zu garantieren, wären nach der folgenden Abb. 81 bei isotroper Streuverteilung nur mindestens 42 Birken notwendig (Berechnung in Anlage 16). Das entspricht einem Mischungsanteil von 10 %. Zwar war in den eigenen Befunden eine geringe Anisotropie der Streuverteilung ersichtlich, aber diese hat keinen großen Einfluss auf die Anzahl der Birken.

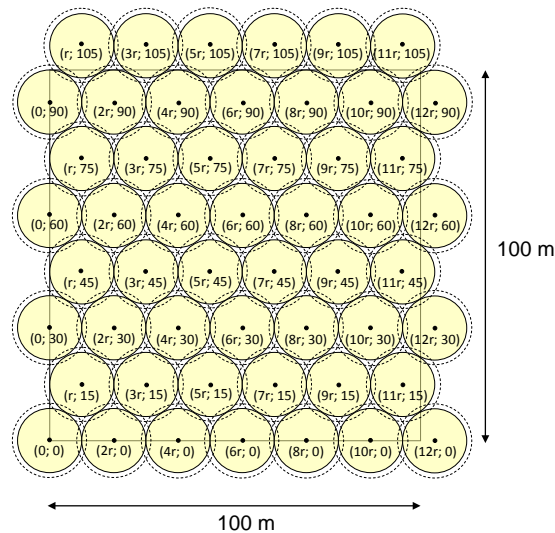


Abb. 81: Einflussbereich und Anordnung der einzelbaumweise eingemischten Birken in einem Fichtenbestand bei angestrebten 25 % Mindest-Birkenstreuanteil (Berechnung in Anlage 16)

An dieser Stelle sei jedoch auf den schon diskutierten Einfluss des Bestandesalters nicht nur bezüglich der Baumdimension, sondern auch im Hinblick auf die Dauer des Einwirkens auf chemische Oberbodeneigenschaften hingewiesen. Aus diesem Grund sollten zukünftig Mischungsanteile je nach Bestandesalter definiert werden. Dennoch können die angegebenen Zahlen als Richtlinie für eine flächige Repräsentanz der Birkenstreu im Bestand dienen.

### **Bodenvegetation**

Kap. 4.2.1 zeigt, dass in den vorliegenden Untersuchungen höhere Deckungsgrade auf dem Fichten-Birken-Transekt vorliegen. In Kap. 4.2.2 konnten klare Unterschiede zwischen den Straten bei den Sippenanzahlen herausgearbeitet werden. Relativ geringe Sippenanzahlen treten im Fichten-Stratum, mittlere im Fichten-Birken-Stratum und hohe im Birken-Stratum auf. Auch bei den Deckungsgraden sind die Werte unter Fichte die kleinsten. Bei der Gesamtbetrachtung der Untersuchungsflächen (Kap. 4.2.3) sind im Fichten-Birken-Teil ähnlich hohe Sippenanzahlen wie im Fichtenbereich zu finden. Einige Sippen kommen entweder nur in der Mischfläche oder nur in der reinen Fichtenfläche vor. Mit Sicht auf die Deckungsgrade zeigen sich sowohl für die Gesamtdeckung als auch für die Kraut- und Moosschicht im Fichten-Birken-Bereich wesentlich höhere Deckungsgrade als im reinen Fichtenteil. Bei den Vegetationsanalysen können also eindeutige Mischungseffekte durch einzelbaumweise eingemischte Birken nachgewiesen werden.

Soll daraus ableitend eine Empfehlung zur Einmischung von Birke in Fichtenbestände gegeben werden, treten einige Probleme bei der Bewertung vorhandener Vegetationsdaten auf. Hohe Artenanzahlen (bzw. Sippenanzahlen) und hohe Diversitäten (Erhöhung der  $\alpha$ -Diversität) sind nicht immer erstrebenswert (MAYER et al. 2002). Ein hoher Natürlichkeitsgrad kann durchaus mit geringen Artenanzahlen verbunden sein (z. B. KÖHL und ZINGG 1996; REIF 2000). Fichtenforste weisen beispielsweise z. T. sehr hohe Artenanzahlen auf, sind aber dennoch häufig naturfern. In solchen Fällen empfehlen MAYER et al. (2002), der Naturnähe ein höheres Gewicht einzuräumen. Für das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit ist aber als natürliche Waldgesellschaft ein Wollreitgras-Fichtenwald und als Stamm-Vegetationsform der Standortserkundung ein Fichten-(Tannen-Buchen)-Wald ausgewiesen (GEMBALLA 2005). Somit ist die Fichte in diesem Gebiet nicht naturfern. Trotzdem macht es Sinn, Baumarten wie die Tanne, Buche und die Eberesche einzumischen. Über die Birke wird in dieser Arbeit diskutiert.

Neben der quantitativen Bewertung der Bodenvegetation ist auch die qualitative sehr wichtig. SCHMIDT und WECKESSER (2001) konnten im Solling feststellen, dass mit zunehmendem Fichten-Anteil die Artenzahlen steigen. Diese enthalten aber keine naturschutzfachlich wertvollen Sippen, sondern vor allem weit verbreitete Grünland-, Ruderal- und Schlagflurarten, was mit einer Abnahme der Naturnähe der Bodenvegetation einhergeht. Es handelt sich teilweise um Arten, die häufig in Biotoptypen mit höheren Hemerobiegraden (eu- bis polyhemerob) vorkommen und i. d. R. weder selten noch gefährdet sind (DENNER 2006). Auch die schwedischen Untersuchungen aus Fichtenreinbeständen (z. B. NIHLGÅRD 1970; SAETRE et al. 1997; ENGELMARK und HYTTEBORN 1999) zeigen, dass es sich um Arten handelt, die weit verbreitet und typisch für die Region sind. Bei der Bewertung von Artenzahlen seien deshalb nach DENNER (2006) unbedingt qualitative Aspekte wie der Anteil typischer Waldarten, der Anteil der Arten des potenziell natürlichen Waldökosystems oder der Anteil von Arten mit geringen Hemerobiegraden zu berücksichtigen.

SCHMIDT (2000) ist der Ansicht, dass nicht Vielfalt an sich, sondern eine für die entsprechenden Landschaften und Lebensräume repräsentative Vielfalt entscheidend ist. Bei der Betrachtung dieser naturschutzfachlichen Kriterien wird also deutlich, dass eine erhöhte Sippenanzahl und Diversität der Bodenvegetation in einem Fichtenforst im Vergleich mit der natürlichen Waldgesellschaft nicht ohne Zweifel herangezogen werden darf. Doch wie sieht es aus, wenn man ein völlig anthropogen beeinflusstes Waldökosystem hinsichtlich eingemischter Laubwaldarten untersucht? Da es sich bei den Fichtenforsten des Erzgebirges um stark durch waldbauliche Maßnahmen, Kalkung und Depositionen geprägte



und in ihren Stoffkreisläufen gestörte Ökosysteme handelt, stellt sich die Frage, ob ein Vergleich mit einer natürlichen Waldgesellschaft sinnvoll ist. Anthropogene Überprägungen fließen bei der Bestimmung der natürlichen Waldgesellschaften über Ökogramme nicht ein, da sich diese nach dem natürlichen Potenzial, sprich der Standortsguppe der Standortskarte, richtet. Eine Änderung der Vegetationszusammensetzung ist also z. B. durch Kalkungen, Depositionen, Bewirtschaftungseffekte usw. anzunehmen. Auf solch einem veränderten Standort ist folglich zu erwarten, dass die Vegetation einen schlechteren oder besseren Standortzustand anzeigt. Für die weiteren Interpretationen sollte deshalb ein strenges Festhalten an der Naturnähe als Maßstab vermieden werden. Wirtschaftswälder sind für den Menschen nicht mehr wegzudenken, und die Fichte ist eine der wichtigsten Wirtschaftsbaumarten in Deutschland. Deshalb ist vor allem zu erwägen, ob es Möglichkeiten gibt, Fichtenforste durch Beimischung von Laubbaumarten (wie Birke) aufzuwerten. Wirtschaftswälder sollten also vor allem untereinander, sowohl in Bezug auf Quantität als auch Qualität der Bodenvegetation, verglichen werden. Doch wie bewertet man die Qualität, wenn die natürliche Waldgesellschaft nicht als Maßstab herangezogen wird? Ist man sich nämlich der Ökologie der Birke bewusst, sind wohl die Störungszeiger, also die oft so negativ angepriesenen und häufig vorkommenden Grünland-, Ruderal- und Schlagflurarten, zu erwarten. Es handelt sich folglich um weit verbreitete Arten, die auch in Fichtenreinbeständen zu finden sind. Eine Mischung aus Fichte und Birke lässt bei einem Vergleich mit einem naturnahen Wald dann wohl keinen Qualitätsgewinn aus Naturschutzsicht erwarten. Ein anderes Kriterium wäre die Suche nach Arten der Roten Liste. In den eigenen Untersuchungen konnten aber keine gefährdeten Arten dieser Liste festgestellt werden. Es war lediglich eine Art zu finden, die auf der Vorwarnliste steht, nämlich *Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske. Diese wuchs im Fichten-Birken-Stratum. Auch FELTON et al. (2010) stellten für die 75 Waldgefäßpflanzenarten der schwedischen Roten Liste (GÄRDENFÖRS 2005) keinen Nutzen durch die Einmischung von Birke in Fichtenbestände fest. Nach DENNER (2006) geben JENSSEN und HOFMANN (2002 und 2005) sowie HOFMANN et al. (2003) an, dass eine Erhöhung der Naturnähe forstwirtschaftlich begründeter Waldbestände vielfach einen deutlichen Verlust an Pflanzenartenvielfalt bedeutet und dass hiervon (sofern vorhanden) auch Arten der Roten Listen (z. B. aus den Familien *Pyrolaceae* und *Orchidaceae*) betroffen sind. Nach FELTON et al. (2010) sind auch die rotgelisteten auf dem Boden wachsenden Moosarten nicht in Fichten-Birken-Wäldern sondern in anderen Waldbeständen vertreten. GRANKE et al. (2004) fassten zusammen (vgl. PLACHTER 1991): Vergleiche von Naturwald und Wirtschaftswald derselben Waldgesellschaft in Nordostpolen (Bialowieza) machten deutlich, dass im Diasporenreservoir des letzteren dreimal so viele Arten enthalten sind (ABS et al 1993). Es han-

delte sich hierbei allerdings um waldfremde Arten bzw. Störungszeiger. Kalk-Fichtenforste in der Schwäbischen Alb enthalten wesentlich mehr Gefäßpflanzen- und Moosarten als naturnahe Kalk-Buchenwälder (ENGELHARD 2004). Es ist also sehr schwierig, geeignete Maßstäbe für einen Wirtschaftswald aus Fichte und Birke zu finden. Doch können die in den eigenen Untersuchungen ermittelten durch Strukturvielfalt und Laubbaumeinmischung begünstigten Veränderungen der Sippenanzahlen und Deckungsgrade der Bodenvegetation in einem so stark menschlich geprägten Ökosystem nicht auch positiv bewertet werden?

HORNSCHUCH und RIEK (2009) erläutern, dass zur Unterscheidung primärer und sekundärer Waldgesellschaften von anthropogen begründeten Forstgesellschaften hohen Hemerobiegrades<sup>4</sup> vor allem Trennarten (syn. Differenzialarten), die i. d. R. mehr oder weniger nitrophile Störungszeiger sind (TÜXEN 1950; MEISEL-JAHN 1955; PASSARGE 1962 und 1968; HOFMANN 1969; ZERBE 1993; ZERBE und SUKOP 1995), herangezogen werden. Auf diese Weise zeichnet sich ein Nadelbaumforst auf laubbaumfähigem Standort durch anspruchsvollere Bodenvegetationsarten aus, als es ein naturnaher Nadelwald nährstoffarmer Böden aufzuweisen hätte (HORNSCHUCH und RIEK 2009). Den beiden Autoren zufolge entspricht nach dem Nordostdeutschen Verfahren der forstlichen Standortserkundung im Fall der Forstvegetation die „Zustands-Vegetationsform“ – die in Beziehung zur aktuellen „Zustands-Humusform“ steht – nicht der Vegetationsausprägung, die sich im Gleichgewicht mit den angestammten Standortverhältnissen befinden würde (KOPP und SCHWANECKE 1994). Bei Zugrundelegung der Artmächtigkeiten derartiger (soziologisch-) ökologischer Artengruppen kann eine sicherere und differenziertere Diagnose erfolgen, als wenn nur das Vorkommen einzelner Trennarten berücksichtigt wird.

WAGNER et al. (2011) arbeiteten heraus, dass möglicherweise der Streufall auch die Verjüngung der Baumarten beeinflusst. Dieser kann positiv oder negativ für die Verjüngung sein. Für bestimmte Arten (sowohl krautige als auch verholzte Pflanzen) existieren dazu schon Ergebnisse. Einige Untersuchungen zeigten, dass die Streumächtigkeit die Verjüngung hemmte (HOLDEREGGER 1996; AUGUSTO et al. 2003), während andere Untersuchungen die Streu als nützlich bei Saatexperimenten herausstellten (AMMER et al. 2002). Zukünftig sollten also bodenkundliche Forschungen und Streufallexperimente

---

<sup>4</sup> Hemerobie: gegenwärtiges Standortspotenzial und Beurteilung der aktuellen Vegetation in ihrer ökologischen Beziehung zum Standort (JALAS 1955 und SUKOPP 1972, zit. n. HORNSCHUCH und RIEK 2009). Demnach ist entscheidend, ob und in welchem Maße das Ökosystem mit all seinen biotischen und abiotischen Komponenten selbsterhaltend und stabil, d. h. unabhängig von anthropogener Energiezufuhr ist und seine Stoffkreisläufe geschlossen sind (HORNSCHUCH und RIEK 2009)

auch mit Bodenvegetationsuntersuchungen, inklusive der Sicht auf die Baumartenverjüngung kombiniert werden. Das wäre auch ein Weg, um die Bodenvegetation qualitativ zu bewerten. Denn so könnten sowohl positive als auch negative Aspekte der Begleitvegetation und der anfallenden Streu sowie der Oberbodeneigenschaften für die Verjüngung der Wirtschaftswälder untersucht werden. WAGNER et al. (2011) schreiben dazu, dass für die zentraleuropäischen Bedingungen besonders die Grasarten wie *Calamagrostis epigejos*, *Calamagrostis villosa*, *Carex brizoides*, *Deschampsia cespitosa*, *Deschampsia flexuosa* und *Molinia caerulea* beachtet werden müssen. Diese Arten repräsentieren das „Hauptunkraut“ in Forstökosystemen (RÖHRIG et al. 2006).

### **Schlussbemerkungen**

Die Wahl eines bestimmten Biodiversitätsmaßes ist wesentlich bestimmt von der Wertschätzung bestimmter Aspekte von Biodiversität (BAUMGÄRTNER 2003). Eine Messung und Bewertung der Biodiversität sollte zukünftig also nicht unabhängig voneinander erfolgen. Ökologische und ökonomische Betrachtungsweisen zur Diversität müssen dabei vereint werden. Das ist leider bis heute selten der Fall. Es existieren schon Modellansätze, um beispielsweise Einzelbaumeffekte in Fichtenwäldern auf die Bodenvegetation (z. B. ØKLAND 1999) oder Effekte von waldbaulichen Maßnahmen auf die räumliche Heterogenität und damit die Artendiversität von Waldbeständen zu quantifizieren (z. B. PRETZSCH 1996). Derartige Modellansätze müssen weiterentwickelt und zusätzlich u. a. durch ökonomische Kriterien ergänzt werden. BAUMGÄRTNER (2003) betont, dass Ökonomen oft in den Maßen der Ökologen keine Lösung ihres Auswahlproblems sehen, und auch umgekehrt haben Ökologen oft kein Verständnis dafür, dass versucht wird, ein ökonomisch operationales Maß für die Biodiversität zu finden. Um waldbauliche Empfehlungen geben zu können, muss es zukünftig vor allem darum gehen, die ökologischen Maße genauer anzusehen und zu prüfen, welche davon prinzipiell für ökonomische Fragestellungen geeignet sein könnten. Hierbei sind wiederum Fragen aus der aktuellen Grundlagenforschung unentbehrlich. Denn um Maße zu finden, die zweckmäßig sind, etwas über die Systemfunktionalität auszusagen und daraus waldbaulichen Optionen abzuleiten, braucht man eine Systemtheorie, die bis heute weitgehend fehlt (vgl. BAUMGÄRTNER 2003).

### **Schlussfolgerungen**

*Die Birke ließ überwiegend positivere Oberbodeneigenschaften im Vergleich zur Fichte erkennen. Aus standortkundlicher Sicht wird deshalb eine Einmischung von Birke in Fichtenbestände empfohlen. Ein Mischungsgrad von mindestens 0,1 wird diskutiert. Diese Zahl wäre aber zukünftig noch durch weitere ökologische und ökonomische Forschung zu überprüfen und eventuell zu untermauern. Dabei sollten vor allem die Produktionsziele und die waldbaulichen Behandlungskonzepte für Mischbestände aus Fichte und Birke in Deutschland erneut festgelegt werden.*

*Die Erörterung der vorliegenden Befunde machte deutlich, dass die einzelnen genannten Studien teilweise zu unterschiedlichen Untersuchungsergebnissen führen und es folglich auf diesem Gebiet noch sehr großen Forschungsbedarf gibt. Das wachsende Interesse an der Aufklärung von Einzelbaum- und Mischungseffekten sowie von horizontalem und vertikalem Strukturreichtum wird zukünftig dabei helfen. Es ist nicht mehr ausreichend, Durchschnittswerte eines reinen Nadelholzbestandes mit einem Mischbestand aus Koniferen und Laubholz oder mit einem Laubholzbestand zu vergleichen. Von größerem Interesse ist die Vielfalt möglicher Merkmalsausprägungen (z. B. kleinräumliche Muster von Oberbodeneigenschaften, Bodenvegetation) in den einzelnen Beständen. Dabei ist es ratsam, sowohl die Qualitäts- und Zuwachsansprüche an die gewünschten Baumarten als auch deren positiven ökologischen Effekte bei sich verändernden Standortbedingungen zu vereinen. Die zukünftigen ökologischen Messungen sollten dann sowohl quantitativ (z. B. Strahlungsintensitäten und Feuchtegehalte) als auch qualitativ (z. B. Strahlungszusammensetzung und Pflanzenverfügbarkeit des Bodenwassers) erfolgen. Ein besonderes Augenmerk muss auf mögliche Wechselwirkungen (Synergien und Antagonismen) zwischen einzelnen Faktoren gelegt werden.*

*Die Zusammenführung wichtiger Ergebnisse aus den verschiedenen forstlichen Forschungsbereichen (z. B. Standortkunde, Vegetationskunde, Waldwachstumskunde, Ökonomie, Zoologie, Waldbau) bildet eine Schnittstelle, die der Ausgangspunkt für eine rationale, an quantifizierbaren ökologischen Kenngrößen ausgerichtete Forstwirtschaft in Mischbeständen sein könnte.*

## **7. Zusammenfassung/ Summary**

### **Zusammenfassung**

In einem für das Erzgebirge (Sachsen, Südostdeutschland) typischen Wirtschaftswald aus ca. 60-jähriger Fichte (*Picea abies* [L.] KARST.), in den Sand-Birken (*Betula pendula* Roth) eingemischt sind, sollte die Wirkung der Baumartenmischung auf den Oberbodenzustand erfasst und bewertet werden. Die Befunde stammen aus einem Bestand, der sowohl hinsichtlich der Altersstruktur, des Bodentyps als auch der Stoffeinträge und der Kalkung für das Erzgebirge repräsentativ ist. Analysiert wurden photosynthetisch aktive Strahlung, Bodenvegetation, Streumenge und -verteilung, Dynamik der Streuzersetzung, Humuskörpermorphologie sowie chemische und mikrobiologische Oberbodeneigenschaften. Dabei fand ein einzelbaumweiser Ansatz in Kopplung mit Transekten Anwendung. Es wurden eindeutige Effekte durch einzelbaumweise eingemischte Birken nachgewiesen. Mit Hilfe des Einzelbaumansatzes und davon ausgehenden Transekten wurden reine Fichtenbereiche und Mischungsbereiche untersucht. Zusätzlich wurden für die Auswertung drei Straten gebildet. Die Zuordnung dafür war die folgende: Probepunkte unter der Birkenkrone ergaben das Birken-Stratum, Probepunkte unter der Fichte das Fichten-Stratum und Probepunkte im Übergangsbereich zwischen Birke und Fichte das Fichten-Birken-Stratum.

Im Bereich der Birkenkronen waren überwiegend höhere Strahlungswerte festzustellen als unter den Fichtenkronen. Gezeigt wurde aber auch, dass die höheren Strahlungswerte, die unter den Birkenkronen auftraten, auch in lichtereren bzw. lückigeren Partien des reinen Fichtenbestandes zu finden waren. Die Sippenanzahl der Bodenvegetation erhöhte sich sowohl unter reiner Fichte als auch in Mischung von Fichte und Birke vor allem mit zunehmender Annäherung zum Kronenrand. Insgesamt waren aber bei der Mischung von Fichte und Birke ähnlich hohe Sippenanzahlen wie im reinen Fichtenbereich zu finden. Allerdings gab es Sippen, die nur auf einer der beiden Flächen auftraten. Es waren höhere Deckungsgrade bei der Mischung von Fichte und Birke im Vergleich zur reinen Fichte sichtbar. Die Befunde der Streusammler ließen erkennen, dass in einer Entfernung von > 16 m vom Birkenstamm kaum noch Birkenstreu auftrat. Nennenswerte Trockenflusssichten wurden nur in einem Radius von 10 m festgestellt. In diesem Bereich ist ein Effekt der Birkenstreu auf die Oberbodeneigenschaften zu erwarten. Die Gesamttrockenmasse einer relativ vitalen Birke mit rund 38 cm Brusthöhendurchmesser betrug im Untersuchungsjahr rund 8 kg. Die Modellierung unter Hinzunahme weniger vitaler Birken reduzierte die Gesamttrockenmasse auf 6,3 kg. Der Massenverlust der Birkenblätter in den Litter-

Bags war in allen drei Straten bei der Mischung der Birkenblätter mit Fichtennadeln im Verhältnis 5:1 am größten. Bei den Fichtennadeln zeigten sich die höchsten Trockenmassenverluste in den reinen Nadel-Litter-Bags. Die Litter-Bags unter der Birkenkrone wiesen für alle Varianten die beste Zersetzung der Birkenblätter und der Fichtennadeln auf. Die C/N-Verhältnisse der Streu ließen keine eindeutigen positiven Effekte der Birkenkrone erkennen. Sie waren aber bei den Birkenblättern in allen Varianten, in allen Straten und zu allen Terminen deutlich enger als die der Fichtennadeln. Desweiteren war der Abfall der C/N-Kurven bei den Birkenblättern steiler als bei den Fichtennadeln. Die Mächtigkeit des Of-Horizontes wies sowohl in der Mischsituation als auch in der reinen Fichtenfläche deutlichere räumliche Muster auf als im Oh-Horizont. Im Of waren dadurch deutliche, vom Einzelbaum abhängige, Muster zu erkennen. Die höchsten Mächtigkeiten traten in Stammnähe auf. Die größten Gesamtmächtigkeiten existierten unter reiner Fichte. Beim Vergleich der Mächtigkeiten in den Straten war in der Of-Lage vor allem das Birken-Stratum signifikant verschieden vom Fichten-Stratum. Für die Oh-Mächtigkeit und somit auch die Gesamtmächtigkeit zeigte zusätzlich das Fichten-Birken-Stratum signifikante Unterschiede im Vergleich zum Birken-Stratum. Als Humusform trat der rohhumusartige Moder auf. Dabei überwog im Fichtenstratum der feinhumusreiche rohhumusartige Moder, im Fichten-Birken-Stratum und im Birken-Stratum dagegen der feinhumusarme rohhumusartige Moder. Signifikante Unterschiede zwischen Straten konnten in der Of-Lage für den pH-Wert,  $C_{\text{ges}}$ -Vorrat,  $C_{\text{carbonat}}$ -Gehalt,  $N_{\text{ges}}$ -Gehalt,  $N_{\text{ges}}$ -Vorrat, und den metabolischen Quotienten erfasst werden. In der Oh-Lage waren es die nachstehenden Oberbodeneigenschaften:  $C_{\text{org}}$ /N-Verhältnis,  $C_{\text{ges}}$ -Gehalt,  $N_{\text{mik}}$ -Gehalt,  $C_{\text{mik}}$ /N<sub>mik</sub>-Verhältnis, Basal-atmungsaktivität, sowie der metabolische Quotient, die sich zwischen den Straten signifikant unterschieden. Im A-Horizont zeigten sich signifikante Unterschiede der Straten beim  $C_{\text{org}}$ /N-Verhältnis,  $C_{\text{ges}}$ -Gehalt,  $C_{\text{carbonat}}$ -Gehalt,  $C_{\text{org}}$ -Gehalt sowie dem  $N_{\text{ges}}$ -Vorrat. Mit Hilfe der multivariaten Ordination (mit verschiedenen Elementgehalten und pH-Werten) ist die Stratenbildung erneut bestätigt worden. Dabei hatten die Elemente C, Mg, Ca und N den größten Einfluss. Die Auswertung der Daten der effektiven Kationenaustauschkapazität ließ vor allem für den A-Horizont Unterschiede zwischen den Straten erkennen. Dabei war die  $Ak_{\text{eff}}$  im Fichtenstratum am kleinsten und der prozentuale Anteil der sauren Kationen an der  $Ak_{\text{eff}}$  am größten. Die höchste  $Ak_{\text{eff}}$  besaß das Birken-Stratum.

Eine Reihe der untersuchten Größen ließen eindeutige Baumarteneffekte erkennen. Alles in allem wurde der Nachweis erbracht, dass die Effekte in dem Bereich zu finden sind, der durch die Laubstreu der Birken geprägt ist. Bei den Oberbodeneigenschaften wurden keine Veränderungen an Punkten, die mehr als 10 m vom Birkenstamm entfernt waren, fest-

gestellt. Aus den Ergebnissen war abzuleiten, dass für ähnliche Bedingungen wie im Untersuchungsbestand ein Mischungsanteil der Birke von mindestens 10 % zu empfehlen ist. Die Ergebnisse sind aber durch zukünftige Forschung noch zu verifizieren. Dafür sollten vor allem die Produktionsziele und die waldbaulichen Behandlungskonzepte für Mischbestände aus Fichte und Birke in Deutschland erneut konkretisiert werden. Um dafür eindeutige ökologische und ökonomische Kriterien festlegen zu können, wird eine Zusammenführung wichtiger Ergebnisse aus den verschiedenen forstlichen Forschungsbereichen (z. B. Standortkunde, Vegetationskunde, Waldwachstumskunde, Ökonomie, Zoologie, Waldbau) empfohlen.

### **Summary**

#### **Site ecological effects of trees in a mixed stand of Norway spruce (*Picea abies* [L.] KARST.) and silver birch (*Betula pendula* Roth) in the Ore Mountains (Saxony, SE Germany)**

In a typical managed forest of the Ore Mountains (Saxony, SE Germany), consisting of 60 years old Norway spruce (*Picea abies* [L.] KARST.) admixed with silver birches (*Betula pendula* Roth) the impact of the admixture on topsoil properties was quantified and evaluated. This study was conducted in a stand which is representative for the Ore Mountains regarding the soil type, deposition and liming. Photosynthetic active radiation, the layer of herbs and mosses, the mass and distribution of the litter fall, the dynamics of litter decomposition, and morphology of the humus layer as well as the chemical and microbiological topsoil properties were all analyzed. The study was based on a single-tree-approach where samples were collected along transects from selected sample trees of birch and spruce. Transects were established within areas of pure spruce as well as within areas of spruce and birch mixture. Three different strata were defined based on the situation of the examined points in relation to the crowns of birch and spruce: the birch stratum, the spruce stratum and the spruce-birch stratum with measurements from underneath the crowns of birches, spruces and the transition area between spruce and birch crowns, respectively.

Higher photosynthetic active radiation values were detected in the area underneath the crowns of birch crowns in comparison with the area underneath the crowns of spruce. Higher values of photosynthetic active radiation were also registered within areas of light foliage and in gaps in the pure spruce stand. The number of ground vegetation species

underneath pure spruce and in the mixture of spruce and birch was negatively correlated with the distance to the crown edge. But altogether the same number of ground vegetation species was found in the mixed stand and in the pure spruce stand. A few species were, however, specific for each stand type. A higher coverage of ground vegetation was found in the mixture of spruce and birch in comparison to the pure spruce. The results of the litter traps show marginal densities of birch leaves at a distance of more than 16 m from the birch stem. The majority of the dry flux density was found within a radius of 10 m around the birch stem. Within this area an effect of the birch litter on top soil properties was expected. The whole dry litter mass was measured in the study time of a relative vital birch with a diameter at breast high of ca. 38 cm and was ca. 8 kg. Modeling the amount of litter for birches with lower vitality indicated a dry litter mass of 6.3 kg. The mass lost of the birch leaves in the litter bags was in each stratum the highest at a ratio of 5 to 1 of birch leaves to spruce needles. The greatest loss of dry mass for spruce needles was registered in litter-bags with pure needles. The litter-bags under the birch crowns exhibited the best decomposition rate of birch leaves and spruce needles for all variants. The C/N-ratios of the litter showed no clear positive effects of the birch crown. But they were clearly smaller for the birch leaves in contrast to the spruce needles in all variants, in each stratum and at all dates. Furthermore the C/N-curves drop away more for the birch leaves in contrast to the spruce needles. The thickness of the Of-horizon in contrast to the Oh-horizon showed clear spatial patterns for the mixed situation and the pure spruce area. Thus in the Of-horizon a clear spatial pattern in connection to the single tree was apparent. The highest thickness was found close to the stem. The highest total thickness of the Of- and Oh-horizon was found underneath the pure spruce stand. When comparing the thickness of the humus layers between the strata, significant differences were found for the Of-layer between the birch stratum and the spruce stratum. In addition, for the thickness of the Oh-layer as well as for the total thickness of all layers, significant differences were observed between the spruce-birch stratum and the birch stratum. The humus form was a mor-like moder. In the spruce stratum more fine-humus-rich variants of the mor-like moder was found, in the spruce-birch stratum and in the birch stratum it was more fine-humus-poor variants of the mor-like moder. Significant differences between the strata in the Of-layer were found with respect to acidification, the pool of  $C_{tot}$  and  $N_{tot}$ , the content of  $C_{carbonat}$  and  $N_{tot}$  and the metabolic quotient. For the Oh-layer significant differences between the strata were found for the ratio of  $C_{org}$  and N, the content of  $C_{tot}$  and  $N_{mic}$ , the ratio of  $C_{mic}$  and  $N_{mic}$ , the basal respiration activity and the metabolic quotient. In the A-horizon significant differences between the strata were found for the ratio of  $C_{org}$  and N, the content of  $C_{tot}$ ,  $C_{carbonat}$  and  $C_{org}$  and the pool of  $N_{tot}$ . The results of



multivariate ordination confirm the formation of stratum again. Thereby the contents of C, Mg, Ca and N had the greatest influence. The data analysis of the effective cation exchange capacity (ECEC) showed differences between the stratum mainly for the A horizon. In the spruce stratum the ECEC was lowest and the percentage of acid cations at the ECEC was greatest. The highest ECEC was in the birch stratum.

Different results showed clear tree effects. These were only found in areas, which are influenced by birch leaves. In this study, a minimum tree admixture of 10% was required before an impact on the ground conditions of the whole stand was observed. Therefore, based on the results of this study, an admixture of birch of 10% is recommended. These results however must be verified through future research. These findings can be used to assist in meeting the goals of silvicultural management for mixed spruce and birch forests in Germany. Definition of explicit ecological and economic criteria created from a combination of results from different forest research sectors (e. g. Site ecology, Vegetation science, Forest Growth, Economy, Zoology, Silviculture) is recommended.

## **8. Literaturverzeichnis**

- AAS, G. (2000):** Die Rolle der Birke im Waldbau. In: Beiträge zur Sandbirke. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Freising. Heftnummer 28: 1-5.
- AD-HOC-AG BODEN (2005):** Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern der BRD. 5. verbesserte und erweiterte Aufl. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Hannover. 438 S.
- AGESTAM, E. (1985):** A growth simulator for mixed stands of pine, spruce and birch in Sweden. Department of Forest Yield Research. Swedish University of Agricultural Sciences. Garpenberg. Report No.15. 150 S. (in Swedish with English summary).
- AG VBB (Arbeitsgruppe "Vollzug Bodenbiologie VBB) (2009):** Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter. Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL. Frick. 25 S.
- AKAIKE, H. (1973):** Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: B. N. PETROV (Hrsg.) u. a.: Proceedings of the Second International Symposium on Information Theory Budapest. Akademiai Kiado: 267-281.
- AK STO (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG IN DER ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTEINRICHTUNG) (2003):** Forstliche Standortsaufnahme. 6. Aufl. IHW Verlag. Eching bei München. 352 S.
- ALEF, K. (1991):** Methodenhandbuch Bodenbiologie: Aktivitäten, Biomasse, Differenzierung. ecomed Verlag. Landsberg/Lech. 284 S.
- AMMER, C. (2000):** Untersuchungen zum Einfluß von Fichtenbeständen auf die Entwicklung junger Buchen. Berichte aus der Holz- und Forstwirtschaft. Shaker Verlag. Aachen. 185 S.
- AMMER, C.; MOSANDL, R.; KATEB, H. (2002):** Direct seeding of beech (*Fagus sylvatica* L.) in Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) stands – effects of canopy density and fine root biomass on seed germination. For. Ecol. Manage. 159: 59-72.
- AMMER, C.; WAGNER, S. (2002):** Problems and options in modelling fine-root biomass of single mature Norway spruce trees at given points from stand data. Can. J. For. Res. 32: 581-590.
- AMMER, C.; WAGNER, S. (2005):** An approach for modelling the mean fine-root biomass of Norway spruce stands. Trees 19: 145-153.
- AMMER, S.; MAKESCHIN, F. (1994):** Effects of simulated acid precipitation and liming on earthworm fauna (Lumbricidae, Oligochaeta) and humus type in a mature stand of Norway spruce (Höglwald experiment). Forstw. Cbl. 113: 70-85.
- ARENS, D. (2010):** Der Deutsche Wald. Fackelträger Verlag. Köln. 410 S.
- ASPELMEIER, S.; LEUSCHNER, C. (2004):** Genotypic variation in drought response of silver birch (*Betula pendula*): leaf water status and carbon gain. Tree Physiol. 24: 517-528.
- ASPELMEIER, S.; LEUSCHNER, C. (2006):** Genotypic variation in drought response of silver birch (*Betula pendula* Roth): leaf and root morphology and carbon partitioning. Trees 20: 42-52.
- ATKINSON, M. D. (1992):** *Betula pendula* Roth (*B. verrucosa* Ehrh.) and *B. pubescens* Ehrh. J. Ecol. 80: 837-870.
- AUBERT, M.; MARGERIE, P.; ERNOULT, A.; DECAËNS, T.; BUREAU, F. (2006):** Variability and heterogeneity of humus forms at stand level: Comparison between pure beech and mixed beech-hornbeam forest. Ann. For. Sci. 63: 177-188.
- AUGUSTO, L.; DUPOUEY, J. L.; RANGER, J. (2003):** Effects of tree species substitution on understory vegetation and environmental conditions in temperate forests. Ann. For. Sci. 60: 823-831.
- AUGUSTO, L.; RANGER, J.; BINKLEY, D.; ROTHE, A. (2002):** Impact of several common tree species of European temperate forest on soil fertility. Review. Ann. For. Sci. 59: 233-253.
- BARBIER, S.; GOSSELIN, F.; BALANDIER, P. (2008):** Influence of tree species on understory vegetation diversity and mechanisms involved – a critical review for temperate and boreal forests. For. Ecol. Manage. 254: 1-15.
- BARITZ, R. (2003):** Humus forms in forests of the Northern German Lowlands. Geologisches Jahrbuch. Sonderhefte. Reihe F Bodenkunde. Heft SF 3. (Hrsg.) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Roh-

- stoffe und den Staatlichen Geologischen Diensten in der BRD. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Hannover. 145 S.
- BARKMANN, J. J. (1992):** Canopies and microclimate of tree species mixtures. In: CANNEL, M. G. R.; MALCOLM, D. C.; ROBERTSON, P. A. (1992): The Ecology of Mixed-Species Stands of Trees. Special publications. Nr. 11 of the British Ecological Society. Blackwell Scientific Publications London. Oxford: 181-188.
- BARTELS, H. (1993):** Gehölzkunde: Einführung in die Dendrologie. Ulmer. Stuttgart. 336 S.
- BATSCHLET, E. (1981):** Circular Statistics in Biology. Academic Press. London. 371 S.
- BAUMGÄRTNER, S. (2003):** Warum Messung und Bewertung biologischer Vielfalt nicht unabhängig voneinander möglich sind. Interdisziplinäres Institut für Umweltökonomie. Universität Heidelberg. In: WEIMANN, J.; HOFFMANN, A.; HOFFMANN, S. (2003): Messung und ökonomische Bewertung von Biodiversität: Mission impossible? Metropolis Verlag. Marburg: 43-66.
- BEATTY, S. W. (1984):** Influence of Microtopography and Canopy Species on Spatial Patterns of forest Understorey Plants. Ecology 65 (5): 1406-1419.
- BEDBUR, I.; MATTHES, U.; KONOLD, W. (2010):** Pionierbaumarten – Chancen. Verbreitung und Potenziale im Klimawandel in Rheinland-Pfalz. Forst und Holz 65 (7/8): 20-27.
- BEICHELT, F. E.; MONTGOMERY, D. C. (2003):** Teubner-Taschenbuch der Stochastik: Wahrscheinlichkeitstheorie, Stochastische Prozesse, Mathematische Statistik. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag/GWV Fachverlag GmbH. 450 S.
- BENIAMINO, F.; PONGE, J. F.; ARPIN, P. (1991):** Soil acidification under the crown of oak trees, I, Spatial distribution. For. Ecol. Manage. 40: 221-232.
- BENNERT, W. H. (1980):** Über die stoffliche Zusammensetzung von Waldbodenpflanzen eines montanen Hainsimsen-Buchenwaldes, 1. Asche-, Stickstoff- und Proteingehalt. Flora 170: 433-455.
- BENS, O.; BUCZKO, U.; SIEBER, S.; HÜTTL, R. F. (2006):** Spatial variability of O layer thickness and humus forms under different pine beech-forest transformation stages in NE Germany. J. Plant. Nutr. Soil Sci. 169: 5-15.
- BERG, B.; BERG, M. P.; BOTTLER, P.; BOX, E.; BREYMEYER, A.; CALVO DE ANTA, R.; COUTEAUX, M.; ESCUDERO, A.; GALLARDO, A.; KRATZ, W.; MADEIRA, M.; MALKONEN, E.; MCCLAUGHERTY, C.; MEENTEMEYER, V.; MUÑOZ, F.; PIUSSI, P.; REMACLE, J.; VIRZO DE SANTO, A. (1993):** Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality. Biogeochemistry 20: 127-159.
- BERG, B.; STAFF, H. (1980):** Decomposition rate and chemical changes of Scots Pine needle litter. II Influence of chemical composition. Ecol. Bull. 32: 373-390.
- BERGMANN, J.-H. (1993):** Birkenvorwald. - Die Begründung von Birkenvorwäldern mit Hilfe von Schneesäaten. Der Wald 43 (6): 188-189.
- BERGQVIST, G. (1999a):** Stand and wood properties of boreal Norway spruce growing under birch shelter. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. Umeå. 84 S.
- BERGQVIST, G. (1999b):** Wood volume yield and stand structure in Norway spruce understorey depending on birch shelterwood density. For. Ecol. Manage. 122: 221-229.
- BEßLER, H. (2003):** Einzelbaumbezogene Analyse der räumlichen Feinwurzelverteilung für *Betula pendula* (Roth.) in Kiefernbeständen der Düben-Dahlener-Heide. Masterarbeit an der Technischen Universität Dresden. 74 S.
- BINKLEY, D. (1995):** The influence of tree species on forest soils: processes and patterns. In: MEAD, D. J.; CORNFORTH, I. S. (Eds.): Proceedings of the trees and soil workshop. Agronomy society of New Zealand Special Publication. Lincoln University Press. 10: 1-33.
- BMELF (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten) (1994):** Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald – Arbeitsanleitung. Bonn.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft Verbraucherschutz) (2009):** Handbuch „Forstliche Analytik“ (HFA) – eine Loseblatt-Sammlung. Bonn.
- BOCOCK, K. L.; GILBERT, O. J. (1957):** The disappearance of leaf litter under different woodland conditions. Plant Soil 9: 179-185.

- BOETTCHER, S. E.; KALISZ, P. J. (1990):** Single-tree influence on soil properties in the mountains of eastern Kentucky. *Ecology* 71 (4): 1365-1372.
- BOLTE, A.; LAMBERTZ, B.; STEINMEYER, A.; KALLWEIT, R.; MEESENBURG, H. (2004):** Zur Funktion der Bodenvegetation im Nährstoffhaushalt von Wäldern – Studien auf Dauerbeobachtungsflächen des EU Level II-Programms in Norddeutschland. *Forstarchiv* 75: 207-220.
- BÖTTCHER, J.; SPRINGOB, G. (2001):** A carbon balance model for organic layers of acid forest soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 164: 399-405.
- BRANDTBERG, P.-O.; BENGTSSON, J.; LUNDKVIST, H. (2004):** Distributions of the capacity to take up nutrients by *Betula spp.* and *Picea abies* in mixed stands. *For. Ecol. Manage.* 198: 193-208.
- BRANDTBERG, P.-O.; LUNDKVIST, H.; BENGTSSON, J. (2000):** Changes in forest-floor chemistry caused by a birch admixture in Norway spruce stands. *For. Ecol. Manage.* 130: 253-264.
- BRANDTBERG, P.-O.; LUNDKVIST, H. (2004):** Does an admixture of *Betula species* in *Picea abies* stands increase organic matter quality and nitrogen release? *Scan. J. For. Res.* 19: 127-141.
- BRANDTBERG, P.-O.; SIMONSSON, M. (2003):** Aluminium and iron chemistry in the O horizon changed by a shift in tree species composition. *Biogeochemistry* 63: 207-228.
- BREDEMEIER, M.; DOHRENBUSCH, A.; MURACH, D. (1995):** Response of soil water chemistry and fine-roots to clean rain in a spruce forest ecosystem at Solling. FRG. *Water Air Soil Pollut.* 85: 1605-1611.
- BREEMEN, N. van; FINZI, A. C.; CANHAM, C. D. (1997):** Canopy tree-soil interactions within temperate forests: effects of soil elemental composition and texture on species distributions. *Can. J. For. Res.* 27: 1110-1116.
- BRUNNER, A. (1998):** A light model for spatially explicit forest stand models. *For. Ecol. Manage.* 107: 19-46.
- BRUNNER, A. (2005):** tRAYci - A light calculation program for spatially explicit forest stand models – Manual, Danish Centre for Forest, Landscape and Planning. Hørsholm. 21 S.
- BRUSSAARD, L. (1998):** Soil fauna, guilds, functional groups and ecosystem processes. *Appl. Soil Ecol.* 9: 123-135.
- BURCKHARDT, H. (1855):** Säen und Pflanzen nach forstlicher Praxis. Ein Beitrag zur Holzerziehung. Carl Rümpler Verlag. Hannover. 252 S.
- CANHAM, D. C.; FINZI, A. C.; PACALA, S. W.; BURBANK, D. H. (1994):** Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. *Can. J. For. Res.* 24: 337-349.
- CARLI, A.; DRESCHER, A. (2002):** Die Verbesserung der Humusaufgabe durch Laubbäume – das Beispiel sekundärer Fichtenforste in der SE-Steiermark. *Mitt. naturwiss. Ver. Steiermark* 132: 153-168.
- CRAMPTON, C. B. (1982):** Podzolization of soils under individual tree canopies in southwestern British Columbia, Canada. *Geoderma* 28: 57-61.
- CROW, S. E.; LAJTHA, K.; BOWDEN, R. D.; YANO, Y.; BRANT, J.; CALDWELL, B.; SULZMAN, E. (2009):** Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil organic matter in an old-growth forest. *For. Ecol. Manage.* 258: 2224-2232.
- DALE, M. R. T. (2006):** Spatial pattern analysis in plant ecology. 3. Aufl. Cambridge University Press (Cambridge Studies in Ecology). Cambridge. 326 S.
- DEARDEN, F. M.; DEHLIN, H.; WARDLE, D. A.; NILSSON, M.-C. (2006):** Changes in the ratio of twig to foliage in litterfall with species composition, and consequences for decomposition across a long term chronosequence. *Oikos* 115: 453-462.
- DEHLIN, H.; NILSSON, M.-CH.; WARDLE, D. A.; SHEVTSOVA, A. (2004):** Effects of shading and humus fertility on growth, competition, and ectomycorrhizal colonization of boreal forest tree seedlings. *Can. J. For. Res.* 34: 2573-2586.
- DENNER, M. (2006):** Auswirkungen des ökologischen Waldumbaus in der Dübener Heide und im Erzgebirge auf die Bodenvegetation – Ermittlung phytoszönotischer Indikatoren für naturschutzfachliche Bewertungen. Dissertation. Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften. TU Dresden. 323 S.
- DIERSCHKE, H. (1994):** Pflanzensoziologie: Grundlagen und Methoden. Ulmer. Stuttgart. 683 S.
- DIETZE, M. (2006):** Untersuchung sedimentpetrographisch-mineralogischer Eigenschaften quartärer Lagen und Modellierung ihrer Verbreitungsmuster im Tharandter Wald (Sachsen). Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden. 141 S.

- DÖBBELER, H.; ALBERT, M.; SCHMIDT, M.; NAGEL, J.; SCHRÖDER, J. (2007):** Programm zur Bestandesbehandlung und Prognose – Handbuch zur gemeinsamen Version von BWINPro und BWINPro-S Version 6.3. Niedersächsische/Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt – Abteilung Waldwachstum in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Waldwachstumskunde und Holzmeßlehre der Technischen Universität Dresden.
- DUNGER, W.; FIEDLER, H. J. (1997):** Methoden der Bodenbiologie. 2. Aufl. Gustav Fischer Verlag. Jena. 539 S.
- DÜLL, R. (1997):** Exkursionstaschenbuch der Moose: Eine Einführung in die Mooskunde mit besonderer Berücksichtigung der Biologie und Ökologie der wichtigsten Moose Deutschlands und für die Lupenbestimmung der leicht erkennbaren Arten im Gelände. 5. Aufl. IDH Verlag für Bryologie und Ökologie. Bad Münstereifel. 280 S.
- DURWEN, K.-J. (1982):** Zur Nutzung von Zeigerwerten und artspezifischen Merkmalen der Gefäßpflanzen Mitteleuropas für Zwecke der Landschaftsökologie und -planung mit Hilfe der EDV. Voraussetzungen, Instrumentarien, Methoden und Möglichkeiten. Arbeitsber. Lehrstuhl f. Landschaftsökologie Münster 5. 138 S.
- EDMONDS, R. L. (1979):** Decomposition and nutrient release in Douglas-fir needle litter in relation to stand development. Can. J. For. Res. 9: 132-140.
- EDMONDS, R. L.; THOMAS, T. B.; RHODES, J. J. (1991):** Canopy and soil modification in a temperate rain forest. Soil Sci. Soc. Am. J. 55: 1685-1693.
- EISENHAUER, D.-R.; ROCH, T.; IRRGANG, S.; SONNEMANN, S.; GEMBALLA, R. (2005):** Bestandeszieltypen – Richtlinie für den Staatswald des Freistaates Sachsen. Herausgeber Landesforstpräsidium Sachsen.
- EKÖ, P. M. (1985):** A growth simulator for Swedish forests, based on data from the national forest survey. Department of Silviculture. Swedish University of Agricultural sciences. Umeå. Report No. 16. 224 S. (in Schwedisch mit englischer Zusammenfassung).
- ELLENBERG, H.; WEBER, H. E.; DÜLL, R.; WIRTH, V.; WERNER, W. (2001):** Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. 3. Aufl. SCRIPTA GEOBOTANICA XVIII. Erich Goltze Verlag. Göttingen. 262 S.
- ELLENBERG, H.; WEBER, H. E.; DÜLL, R.; WIRTH, V.; WERNER, W.; PAULISSEN, D. (1992):** Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. 2. Aufl. SCRIPTA GEOBOTANICA XVIII. Erich Goltze Verlag. Göttingen. 258 S.
- ENGELHARD, J. (2004):** Veränderungen der Bodenvegetation und des Oberbodenzustandes durch Fichtenanbau auf Standorten des Kalkbuchenwaldes. Tagung „Kalkbuchenwälder der Schwäbischen Alb am 29.01.2004“ in Freiburg i. Br., 3 S.
- ENGELMARK, O.; HYTTEBORN, H. (1999):** Coniferous forests. In: RYDIN, H.; SNOEIJIS, P.; DIEKMANN, M. (Eds.). Acta Phytogeogr. Suec.: 55-74.
- FAHLVIK, N.; AGESTAM, E.; EKÖ, P. M.; LINDÉN, M. (2011):** Development of single-storied mixtures of Norway spruce and birch in Southern Sweden. Scand. J. For. Res. 26: 1-10.
- FAHLVIK, N.; AGESTAM, E.; NILSSON, U.; NYSTRÖM, K. (2005):** Simulating the influence of initial stand structure on the development of young mixture of Norway spruce and birch. For. Ecol. Manage. 213: 297-311.
- FEGER, K.-H. (1994):** Bodenfunktionen und forstwirtschaftliche Bodennutzung. In: AßMANN, G.; FROESE, B. und HAURY, H.-J. (1994): Ökosystem Boden – ausgebeutet und zerstört? GSF-Seminar Information Umwelt 13: 5-19.
- FEGER, K.-H. (1996):** Schutz vor Säuren. In: BLUME, H.-P.; FELIX-HENNINGSEN, P.; FISCHER, W. R.; FREDE, H.-G.; HORN, R.; STAHR, K. (Hrsg.): Handbuch der Bodenkunde. Kap. 7.6.2. 1. Erg. Lfg. 12. ecomed Verlag. Landsberg. 24 S.
- FELTON, A.; LINDBLADH, M.; BRUNET, J.; FRITZ, Ö. (2010):** Replacing coniferous monocultures with mixed-species production stands: An assessment of potential benefits for forest biodiversity in northern Europe. For. Ecol. Manage. 260: 939-947.
- FERRARI, J. B.; SUGITA, S. (1996):** A spatially explicit model of leaf litter fall in hemlock-hardwood forests. Can. J. For. Res. 26: 1905-1913.

- FIEDLER, E.; FIEDLER, H. J. (1961):** Bodenmikrobiologische Untersuchungen auf einer Kalkungsversuchsfläche des Tharandter Waldes. Arch. Forstwes. 10 (7): 733-751.
- FIEDLER, F. (1962a):** Das Höhenwachstum junger Birken im Vorwaldgefüge auf verschiedenen Standorten. Arch. Forstwes. 11 (7): 860-876.
- FIEDLER, F. (1962b):** Die Bedeutung der Birke als Vorwaldbaumart, ihre massenbildenden Faktoren und ihr Wachstum in den verschiedenen Stufen natürlicher Waldgesellschaften. In: SCHÖNBACH, H. (1962): Probleme der Waldökologie unter besonderer Berücksichtigung der Fichtenwirtschaft im Mittelgebirge. Tagungsberichte der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin. 53: 87-95.
- FIEDLER, F. (1962c):** Die Entwicklung des Vorwaldgedankens unter besonderer Berücksichtigung der Birke. Arch. Forstwes. 11 (2): 174-190.
- FIEDLER, H. J. (1990):** Bodennutzung und Bodenschutz. VEB Gustav Fischer Verlag. Jena. 268 S.
- FIEDLER, H. J. (2001):** Böden und Bodenfunktionen in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten. expert Verlag. Renningen-Malmsheim. 598 S.
- FIEDLER, H.-J.; HUNGER, W. (1970):** Geologische Grundlagen der Bodenkunde und Standortslehre. Steinkopf Verlag: 382 S.
- FINZI, A. C.; BREEMEN, N. van; CANHAM, C. D. (1998a):** Canopy tree-soil interactions within temperate forests: species effects on soil carbon and nitrogen. Ecol. Appl. 8 (2): 440-446.
- FINZI, A. C.; CANHAM, C. D.; BREEMEN, N. van (1998b):** Canopy tree-soil interactions within temperate forests: species effects on pH and cations. Ecol. Appl. 8: 447-454.
- FISCHER, A. (2002):** Forstliche Vegetationskunde: Eine Einführung in die Geobotanik. 2. Aufl. Parey. Berlin. 421 S.
- FISCHER, H. (1992):** Entwicklung der Bodenvegetation auf Femelflächen im Solling. Diplomarbeit des Forstwissenschaftlichen Fachbereiches der Georg-August-Universität Göttingen. 107 S.
- FISCHER, H.; BENS, O.; HÜTTL, R. F. (2002):** Veränderung von Humusform, -vorrat und -verteilung im Zuge von Waldumbau-Maßnahmen im Nordostdeutschen Tiefland. Forstwiss. Cent.bl. 121: 322-334.
- FRAHM, J.-P. (1998):** Moose als Bioindikatoren. Biologische Arbeitsbücher 57. Quelle & Meyer. Wiesbaden. 187 S.
- FRANKLAND, J. C. (1998):** Fungal succession – unravelling the unpredictable. Mycol. Res. 102 (1): 1-15.
- FRIEDEL, J. K.; EHRMANN, O.; PFEFFER, M.; STEMMER, M.; VOLLMER, T.; SOMMER, M. (2006):** Soil microbial biomass and activity: the effect of site characteristics in humid temperate forest ecosystems. J. Plant Nutr. Soil Sci. 169: 175-184.
- FRISCHBIER, N.; ZEIBIG, A. (2008):** Methoden und Ergebnisse einzelbaumorientierter Forschung. Beiträge zur Jahrestagung der Sektion Waldbau 2007. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten (DVFFA). Gotha: 12-25.
- FRIVOLD, L. H.; FRANK, J. (2002):** Growth of mixed birch-coniferous stands in relation to pure coniferous stands at similar sites in south-eastern Norway. Scand. J. For. Res. 17: 139-149.
- FRIVOLD, L. H.; KOLSTRÖM, T. (1999):** Yield and treatment of mixed stands of boreal tree species in Fennoscandia. In: OLSTHOORN, A. F. M.; BARTELINK, H. H.; GARDINER, J. J.; PRETZSCH, H.; HEKHUIS, H. J.; FRANCE, A. (eds). Management of Mixed-species Forest: Silviculture and Economics: 37-45.
- FUKSHANSKY, L. (1991):** Revisiting the hexagonal lattice: On optimal lattice circle packing. Mathematics Subject Classification. Elemente der Mathematik 66 (1): 1-9.
- GÄRDENFÖRS, U. (2005):** Rödlistade arter i Sverige 2005 – The 2005 Red List of Swedish Species. ArtDatabanken. SLU. Uppsala. 496 S.
- GAYER, J. K. (1886):** Der gemischte Wald, seine Begründung und Pflege, insbesondere durch Horst- und Gruppenwirtschaft. Paul Parey Verlag. Berlin. 168 S.
- GEISSEN, V.; GEHRMANN, J.; GENSSLER, L. (2007):** Relationships between soil properties and feeding activity of soil fauna in acid forest soils. J. Plant Nutr. Soil Sci. 170: 632-639.
- GEMBALLA, R. (2005):** Ökogramme der natürlichen Waldgesellschaften und Stamm-Vegetationsformen. 2. leicht veränderte Aufl. Herausgeber Landesforstpräsidium Sachsen. 62 S.

- GESPER, P. L.; HOLOWAYCHUCK, N. (1970):** Effects of stemflow on a Miami soil under a beech tree: II. Chemical properties. Soil Sci. Soc. Am. Proceedings 34: 786-794.
- GIBBS, W. M.; WERKMANN, C. H. (1922):** Effect of tree products on bacteriological activities in soil. 1. Ammonification and nitrification. Soil Sci. 13: 303-322.
- GIMINGHAM, C. H. (1984):** Ecological aspects of birch. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh 85B: 65-72.
- GNOJEK, A. (1992):** Physiological response of suppressed Norway spruce to release from overstory birch. Department of Forest Yield Research. Series Physiological response of suppressed Norway spruce to release from overstory birch. Swedish University of Agricultural Sciences. Garpenberg. 15 S.
- GOBAKKEN, T.; NÆSSET, E. (2002):** Spruce diameter growth in young mixed stands of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and birch (*Betula pendula* Roth *B. pubescens* Ehrh.). For. Ecol. Manage. 171: 297-308.
- GOSZ, J. R.; LIKENS, G. E.; BORMANN, F. H. (1973):** Nutrient release from decomposing leaf and branch litter in the Hubbard Brook Forest. New Hampshire. Ecological Monographs 43 (2): 173-191.
- GRANKE, O.; SCHMIEDINGER, A.; WALENTOWSKI, H. (2004):** Konzept und Schlüsselkriterien für die Bewertung der Biodiversität von Wald-Lebensräumen in Deutschland. Waldökologie online 1: 25-28.
- GREB, M. (2008):** Schlussbericht des BMBF-Projektes „Verwertungsorientierte Untersuchungen der Holzarten *Fagus sylvatica* (Buche) und *Abies grandis* (Küstentanne) aus nachhaltig bewirtschafteten Mischbeständen zur Herstellung innovativer und zukunftsfähiger Holzprodukte und -werkstoffe“ Teilprojekt I: „Verwendungsorientierte Managementstrategien für Buchen-Küstentannen-Mischbestände“.
- GREENE, D. F.; JOHNSON, E. A. (1989):** A model of wind dispersal of winged or plumed seeds. Ecology 70 (2): 339-347.
- GRUSELLE, M.-C.; BAUHUS, J. (2005):** Litter decomposition in mixed spruce-beech stands – a conceptual approach. Berichte Freiburger Forstliche Forschung. In: BAUHUS, J.; CSAPEK, G. (2005): Beiträge zur Tagung 2004 der Sektion Waldbau DVFFA 60: 127-139.
- HADWIGER-FANGMEIER, A.; FANGMEIER, A.; JÄGER, H. J. (1992):** Ammoniak in der bodennahen Atmosphäre – Emission, Immission und Auswirkungen auf terrestrische Ökosysteme. Forschungsberichte zum Forschungsprogramm des Landes Nordrhein-Westfalen „Luftverunreinigungen und Waldschäden“ 28: 206 S.
- HAGEMEIER, M. (2002):** Funktionale Kronenarchitektur mitteleuropäischer Baumarten am Beispiel von Hängebirke, Waldkiefer, Traubeneiche, Hainbuche, Winterlinde und Rotbuche. Dissertationes Botanicae Bd. 361: 154 S.
- HAGEN-THORN, A.; CALLESEN, I.; ARMOLAITIS, K.; NIHLGÅRD, B. (2004):** The impact of six European tree species on the chemistry of mineral topsoil in forest plantations on former agricultural land. For. Ecol. Manage. 195: 373-384.
- HAKES, W. (1996):** Multivariate Ordinationsmethoden zur Analyse von Veränderungen in der Vegetationsstruktur: Grundlagen und Beispiele aus der Sukzessionsforschung und Monitoring, Nat.schutz Landsch.plan. 28 (1): 12-19.
- HARMER, R.; ROBERTSON, M. (2003):** Seedling root growth of six broadleaved tree species grown in competition with grass under irrigated nursery conditions. Ann. For. Sci. 60: 601-608.
- HÄTTENSCHWILER, S. (2005):** Effects of tree species diversity on litter quality and decomposition. In: SCHERER-LORENZEN, M.; KÖRNER, Ch.; SCHULZE, E.-D. (Eds.): Forest Diversity and Function: Temperate and Boreal Systems. Springer Verlag. Berlin und Heidelberg. Ecological Studies 176 (C): 149-164.
- HEGER, A. (1952):** Die Begründung von Mischwäldern auf Großkahlfächen unter besonderer Berücksichtigung des Vorwaldgedankens. Neumann Verlag. Radebeul-Berlin. 64 S.
- HEIM, A.; FREY, B. (2004):** Early stage litter decomposition rates for Swiss forests. Biogeochemistry 70: 299-313.
- HEINRICHS, S.; SCHMIDT, W. (2009):** Vom Fichtenrein- zum Mischbestand: Welchen Beitrag leisten Strauch- und Krautschicht zum Erhalt von Ökosystemfunktionen? Forstarchiv 80: 23-28.
- HEINSDORF, D. (1997):** Boden- und ernährungskundliche Untersuchungen in Kiefern-Buchen-Mischbeständen auf verschiedenen Standorten Brandenburgs. Beitr. f. d. Forstw. und Landschaftsökol. 3: 119-124.

- HEITZ, R. (1998):** Umbau von Fichtenreinbeständen in naturnahe Mischwälder - Auswirkungen auf boden-chemischen Zustand und Bioelementhaushalt. Dissertation. Universität München. 305 S.
- HIRABUKI, Y. (1991):** Heterogeneous dispersal of tree litterfall corresponding with patchy canopy structure in a temperate mixed forest. *Vegetatio* 94: 69-79.
- HOFMANN, G. (1969):** Zur pflanzensoziologischen Gliederung der Kiefernforsten des norddeutschen Tieflandes. *Fedd. Repert.* 80 (4-6): 401-412.
- HOFMANN, G.; JENSSEN, M.; SCHLEHAHN, R. (2003):** Ökologische Voraussetzungen und Wirkungen des Waldumbaus im nordostdeutschen Tiefland, Teilvorhaben B, C (Die Entwicklung der Pflanzenartenvielfalt im Verlauf und Ergebnis der Umwandlung von Kiefernforsten in naturnahe Waldökosysteme). Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 0339731. 68 S.
- HÖHNE, H. (1962):** Vergleichende Untersuchungen über Mineralstoff- und Stickstoffgehalte sowie Trockensubstanzproduktion von Waldbodenpflanzen. *Arch. Forstwes.* 11 (10): 1085-1141.
- HÖHNE, H. (1963a):** Der Mineralstoff- und Stickstoffgehalt von Waldbodenpflanzen. *Arch. Forstwes.* 12 (8): 791-805.
- HÖHNE, H. (1963b):** Untersuchungen über die Pufferkraft und das C/N-Verhältnis der Streu von Waldbodenpflanzen, Sträuchern und Bäumen. *Arch. Forstwes.* 12 (8): 842-863.
- HÖHNE, H.; FIEDLER, H. J.; ILGEB, G. (1981):** Untersuchungen über den Mineralstoffgehalt von *Deschampsia flexuosa* (L.) P. B. als Bestandteil von Fichtenforst-Ökosystemen. *Flora* 171: 199-215.
- HOLDEREGGER, R. (1996):** Effects of litter removal on the germination of *Anemone nemorosa* L., *Flora* 191: 175-177.
- HORNUNG, M. (1985):** Acidification of soils by trees and forests. *Soil Use Manage.* 1: 24-28.
- HORNSCHUCH, F.; RIEK, W. (2009):** Bodenheterogenität als Indikator von Naturnähe? 1. Bewertung der Natürlichkeit anhand verschiedener Kompartimente und Diversitätsebenen unter besonderer Berücksichtigung des Bodens (Literaturstudie). *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz* 7: 35-53.
- HUHTA, V. (1979):** Effects of liming and deciduous litter on earthworm (*Lumbricidae*) populations of a spruce forest, with an inoculation experiment on *Allobophora caliginosa*. *Pedobiologia* 19: 340-345.
- HUTH, F. (2002):** Lückenstrukturen in Fichtenbeständen des Tharandter Waldes und ihre Bedeutung für die Naturverjüngung von *Betula pendula* (ROTH.). Masterarbeit. Fachrichtung Forstwissenschaften Tharandt. 104 S.
- HUTH, F. (2009):** Untersuchungen zur Verjüngungsökologie der Sandbirke (*Betula pendula* Roth). Dissertation. Technische Universität Dresden. 383 S.
- HUTH, F.; WAGNER, S. (2006):** Gap structure of Silver birch regeneration (*Betula pendula* Roth.) in Norway spruce stands (*Picea abies* L. Karst.). *For. Ecol. Manage.* 229: 314-324.
- HUTH, F.; WAGNER, S. (2008):** Verjüngung der Sandbirke (*Betula pendula* Roth.) in Fichten-Reinbeständen (*Picea abies* L.) des Tharandter Waldes. XVII. Waldbau-Kolloquium Brno-Tharandt 15.-17.10.2007: 60-82.
- IMMER, A.; SCHMIDT, W.; MEIWES, K. J.; BEESE, F. (1993):** Langzeitwirkungen von Kalkung und Düngung auf den chemischen Zustand im Oberboden, die Humusformen und die Bodenvegetation in einem Fichtenforst. *Forstw. Cbl.* 112: 334-346.
- IRMLER, U. (1995):** Die Stellung der Bodenfauna im Stoffhaushalt schleswig-holsteinischer Wälder. *Faun.-ökol. Mitt. Suppl.* 18: 1-198.
- ISEMEYER, H. (1952):** Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 56: 26-38.
- JÄGGI, W. (1976):** Die Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Bildung als Maß der bodenbiologischen Aktivität. *Schweiz. Landw. Forschung* 15: 371-380.
- JALA, J. (1955):** Hemerobie und hemerochrome Pflanzenarten. Ein terminologischer Reformversuch. *Acta Soc. pro Fauna et Flora Fenn.* 72 (11): 1-15.
- JENSSEN, M.; HOFMANN, G. (2002):** Phytodiversität und Naturnähe der Wälder. *Ber. des Forschungszentrums Waldökosysteme. Reihe B. Bd. 68.* Göttingen: 56-57.
- JENSSEN, M.; HOFMANN, G. (2005):** Zur Quantifizierung von Naturnähe und Phytodiversität in Waldungen auf der Grundlage der potentiellen natürlichen Vegetation. In: BOHN, U.; HETTWER, C.; GOLLUB, G. (Bearb.): Anwendung und Auswertung der Karte der natürlichen Vegetation Europas. *BfN-Skripten* 156: 297-314.



- JOERGENSEN, R. G. (1995):** The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the  $K_{EC}$  value. *Soil Biol. Biochem.* 28: 25-31.
- JÖGISTE, K. (1998):** Productivity of mixed stands of Norway spruce and birch affected by population dynamics: a model analysis. *Ecol. Model.* 106: 77-91.
- JOHANSSON, T. (2001):** Birch shelter and Norway spruce - Results from trials established in 1983-1984. Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Management and Products. Report 16. 29 S.
- KALELA, E. K. (1950):** On the horizontal root in pine and spruce stands I., *Acta For. Fenn.* 57: 1-79.
- KANEKO, N.; SALAMANCA, E. F. (1999):** Mixed leaf litter effects on decomposition rates and soil microarthropod communities in an oak-pine stand in Japan. *Ecol. Res.* 14: 131-138.
- KATZENSTEINER, K. (2008):** Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft. In: BÖHM, R.; GODINA, R.; NACHTNEBEL, H. P.; PIRKER, O. (Eds.): Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. Wien: 187-195.
- KENT, M.; COKER, P. (1999):** Vegetation description and analysis: A practical approach, John Wiley & Sons Inc. New York. 363 S.
- KIENZLER, M.; ALBAN, D. H.; PERALA, D. A. (1986):** Soil invertebrate and microbial populations under three species on the same soil type. *USDA For. Serv. Res. Note NC-337.* 4 S.
- KLANG, F.; EKÖ, P.-M. (1999):** Tree properties and yield of *Picea abies* planted in shelterwoods. *Scand. J. For. Res.* 14: 262-269.
- KLEBER, A. (1992):** Periglacial slope deposits and their pedogenic implications in Germany. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 99. 361-372.
- KNOKE, T.; AMMER, C.; STIMM, B.; MOSANDL, R. (2008):** Admixing broadleaved to coniferous tree species: a review on yield, ecological stability and economics. *Eur. J. For. Res.* 127: 89-101.
- KÖHL, M.; ZINGG, A. (1996):** Eignung von Diversitätsindizes bei Langzeituntersuchungen zur Biodiversität in Waldbeständen. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 167 (4): 76-85.
- KONOPATZKY, A. (1997):** Zum Standorts- und Vegetationswandel in den Wäldern der Länder Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und des Tieflandsteils von Sachsen-Anhalt. *FZW der Universität Göttingen.* Reihe B. Bd. 56. 125 S.
- KÖNIG, N.; WOLF, B. (1993):** Abschlußbericht über die Ergebnisse und Konsequenzen der im Rahmen der bundesweiten BZE durchgeführten Ringanalysen. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme.* Göttingen. Reihe B. Bd. 33. 334 S.
- KOPP, D.; SCHWANECKE, W. (1994):** Standortlich-naturräumliche Grundlagen ökologiegerechter Forstwirtschaft. *Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin.* 248 S.
- KÖSTLER, J. N.; BRÜCKNER, E.; BIBELRIETHER, H. (1968):** Die Wurzeln der Waldbäume. *Paul Parey Verlag.* Hamburg. 285 S.
- KOWARIK, I.; SEIDLING, W. (1989):** Zeigerwertberechnungen nach Ellenberg. Zu Problemen und Einschränkungen einer sinnvollen Methode. *Landsch. Stadt.* 21: 132-143.
- KREUTZER, K. (1995):** Effects of liming on soil processes. *Plant and Soil* 168-169: 447-470.
- KURZ-BESSON, C.; COUTEAUX, M.-M.; THIERY, J. M.; BERG, B.; REMACLE, J. (2005):** A comparison of Litter-Bag and direct observation methods of Scots pine needle decomposition measurement. *Soil Biol. Biochem.* 37: 2315-2318.
- KÜßNER, R. (1999):** Ein auf Strahlungsmessungen basierendes Verfahren zur Bestimmung des Blattflächenindex und zur Charakterisierung der Überschirmung in Fichtenbeständen. *Forstwiss. Beitr. Tharandt,* Heft 5. *Ulmer Verlag.* Stuttgart. 192 S.
- LANDESVERMESSUNGSAMT SACHSEN (2004):** Sachsen 3D – Das interaktive Kartenwerk 1:25:000, Version 1.5, Amtliche topografische Karten des Landesvermessungsamtes Sachsen. *MagicMaps.* Pliezhausen.
- LANG, E.; BEESE, F. (1985):** Die Reaktion der mikrobiellen Bodenpopulationen eines Buchenwaldes auf Kalkungsmaßnahmen. *AFZ - Der Wald* 43: 1166-1169.
- LANG, E.; BEESE, F.; JAGNOW, G. (1993):** Einfluss von Wassergehalt und Salzen auf die Nitrifikation in Proben einer podsoligen Braunerde. *Z. Pflanzenernähr. Boden.* 156: 83-87.

- LANG, E.; JAGNOW, G. (1986):** Fungi of a forest soil nitrifying at low pH values. FEMS Microbiol. letters (Ecology) 38: 257-265.
- LANU LANDSH (LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN) (2002):** Zehn Jahre vegetationskundliche Untersuchungen auf Boden-Dauerbeobachtungsflächen, Bericht des Kieler Institutes für Landschaftsökologie. 70 S.
- LARCHER, W. (2001):** Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leistung und Streßbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. Ulmer Verlag. Stuttgart. 408 S.
- LAVELLE, P. (1994):** Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. In: Transactions of the 15<sup>th</sup> World Congress on Soil Science. Edited by J.D. Etchevers; A. Aguilar; R. Nunez; G. Alcantar; P. Sanchez. International Society of Soil Science and Mexican Society of Soil Science. Mexico City. Vol. 1: 189-220.
- LEHMANN, B. (2007):** Effekte einzelbaumweise eingemischter einheimischer Eichen in Wäldern der Gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) auf Standorten geringer Trophie und Wasserversorgung im Süden Brandenburgs. Dissertation Technische Universität Dresden. 145 S.
- LEHMANN, B.; FISCHER, H.; SCHUA, K.; WAGNER, S.; MÜLLER, M. (2006a):** Effekte einzelbaumweise eingemischter Trauben-Eichen (*Quercus petraea*) in Wäldern der Gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris*) auf Standorten geringer Trophie und Wasserversorgung. Gemeinsames Waldbau-Kolloquium der Mendel-Universität für Land und Forstwirtschaft Brno und der Technischen Universität Dresden 2005 in Brno.
- LEHMANN, B.; SCHUA, K.; WAGNER, S.; MÜLLER, M. (2006b):** Effekte einzelbaumweise eingemischter Trauben-Eichen (*Quercus petraea*) in Wäldern der Gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris*) auf Standorten geringer Trophie und Wasserversorgung. In: AMMER, Ch.; SCHÖLCH, M.; MOSANDEL, R. (2006): Der Beitrag des Waldbaus zur Mischwaldforschung. Beiträge zur Jahrestagung der Sektion Waldbau 2005. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten (DVFFA).
- LETTL, A.; HYSEK, J. (1994):** Soil microflora in an area where spruce (*Picea abies*) was killed by SO<sub>2</sub> emissions and was succeeded by birch (*Betula pendula*) and mountain ash (*Sorbus aucuparia*). Ecol. Eng. 3: 27-37.
- LEUSCHNER, C. (1994):** Walddynamik in der Lüneburger Heide: Ursachen, Mechanismen und die Rolle der Ressourcen. Habilitationsschrift an der Georg-August-Universität zu Göttingen.
- LEYER, I.; WESCHE, K. (2007):** Multivariate Statistik in der Ökologie. Springer Verlag. Berlin Heidelberg. 217 S.
- LFP - LANDESFORSTPRÄSIDIUM (2004):** Bodenzustandserhebung (BZE) in sächsische Wäldern. erweiterte, aktualisierte Aufl. Heft 28. 64 S.
- LISKI, J. (1995):** Variation in soil organic carbon and thickness of soil horizons within a boreal forest stand – Effect of trees and implications for sampling. Silva Fenn. 29 (4): 255-266.
- LOCKOW, K.-W. (1996):** Ertragstabeln für die Sandbirke (*Betula pendula* Roth) sowie für die Moorbirke (*Betula pubescens* Ehrh.) für das nordostdeutsche Tiefland. Landesforstanstalt Eberswalde. 95 S.
- LORENZ, K.; PRESTON, C. M.; FEGER, K.-H. (2001):** Long-term effects of liming on microbial biomass and activity and soil organic matter quality (<sup>13</sup>C CPMAS NMR) in organic horizons of Norway spruce forests in Southern Germany. J. Plant Nutr. Soil Sci. 164: 555-560.
- LORENZ, K.; PRESTON, C. M.; KRUMREI, S.; FEGER, K.-H. (2004):** Decomposition of needle/leaf litter from Scots pine, black cherry, common oak and European beech at a conurbation forest site. Eur. J. Forest. Res. 123: 177-188.
- LORENZ, K.; PRESTON, C. M.; RASPE, S.; MORRISON, I. K.; FEGER, K. H. (2000):** Litter decomposition and humus characteristics in Canadian and German spruce ecosystems: information from tannin analysis and <sup>13</sup>C CPMAS NMR. Soil Biol. Biochem. 32: 779-792.
- LORENZ, R. J. (1996):** Grundbegriffe der Biometrie. 4. Aufl. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart. 238 S.
- LOZÁN, J. L.; KAUSCH, H. (1998):** Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler. Paul Parey Verlag. 2. Aufl. Berlin. 287 S.
- LUIZÃO, R. C. C.; LUIZÃO, F. J.; PROCTOR, J. (2007):** Fine root growth and nutrient release in decomposing leaf litter in three contrasting vegetation types in central Amazonia. Plant Ecol. 192 (2): 225-236.
- LUNDMARK, T.; HÄLLGREN, J.-E. (1987):** Effect of frost on shaded and exposed spruce and pine seedlings in the field. Can. J. For. Res. 17: 1197-1201.

- v. LÜPKE, B. (2004):** Mischwälder als Mittel zur Risikominderung und naturnaher Waldbau: ein Spannungsfeld. Kongressbericht zur 61. Tagung des Deutschen Forstvereins. Deutscher Forstverein e. V. Göttingen: 364-376.
- MACHADO, J.-L.; REICH, P. B. (1999):** Evaluation of several measures of canopy openness as predictors of photosynthetic photon flux density in deeply shaded conifer-dominated forest understory. *Can. J. For. Res.* 29: 1438-1444.
- MAI, H.; FIEDLER, H. J. (1978):** Mikrobiologische und chemische Untersuchungen zur Melioration von Fichtenrohhumus auf phosphorarmen Mittelgebirgsstandorten. *Zentralbl. Bakteriol. II Abteilung* 133: 17-33.
- MÅRD, H. (1996):** The influence of a birch shelter (*Betula* spp.) on the growth of young stands of *Picea abies*. *Scand. J. For. Res.* 11: 343-350.
- MÅRD, H. (1997a):** Damage and growth response in suppressed *Picea abies* after removal of overstorey birch (*Betula* spp.). *Scand. J. For. Res.* 12: 248-255.
- MÅRD, H. (1997b):** Stratified mixture of young Norway spruce and birch as an alternative to pure stands of Norway spruce. *Acta Univ. Agric. Suec., Silvestria* 35. Uppsala. 29 S.
- MARDIA, K. V.; JUPP, P. E. (2000):** Directional statistics. Wiley series in probability and statistics. Wiley Verlag. Chichester. 430 S.
- MAYER, P.; ABS, C.; FISCHER, A. (2002):** Biodiversität als Kriterium für Bewertungen im Naturschutz – eine Diskussionsanregung. *Nat. Landsch.* 77 (11): 461-463.
- McCLAUGHERTY, C. A.; PASTOR, J.; ABER, J. D.; MELILLO, J. M. (1985):** Forest litter decomposition in relation to soil nitrogen dynamics and litter quality. *Ecology* 66 (1): 266-275.
- MEINUNGER, L.; SCHRÖDER, W. (2007):** Verbreitungsatlas der Moose Deutschlands. Bd. 1-3. herausgegeben von Oliver Dürhammer für die Regensburgische Botanische Gesellschaft von 1790 e. V. Regensburg: Bd. 1 (626 S.). Bd. 2 (699 S.). Bd. 3 (709 S.).
- MEISEL-JAHN, S. (1955):** Die Kiefernforstgesellschaften des nordwestdeutschen Flachlandes. *Angew. Pflanzensoziol.* 11: 1-126.
- MELILLO, J. M.; ABER, J. D.; MURATORE, J. M. (1982):** Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology* 63 (3): 621-626.
- MERILÄ, P.; OHTONEN, R. (1997):** Soil microbial activity in the coastal Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] forests of the Gulf of Bothnia in relation to humus-layer quality, moisture and soil types. *Biol. Fertil. Soils* 25: 361-365.
- MEYER, F.H. (1967):** Feinwurzelverteilung bei Altbäumen in Abhängigkeit vom Substrat. *Forstarchiv* 38: 286-290.
- MIELIKÄINEN, K. (1980):** Structure and development of mixed pine and birch stands. *Commun. Inst. For. Fenn.* 99 (3): 82 S. (in Finnisch mit englischer Zusammenfassung).
- MIELIKÄINEN, K. (1985):** Koivusekoituksen vaikutus kuusikon rakenteeseen ja kehitykseen. (Summary: Effect of an admixture of birch on the structure and development of Norway spruce stands), Helsinki, Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 133. 79 S.
- MILES, J. (1981):** Effects of trees on soils. In: LAST, F. T.; GARDINER, A. S. (Eds.): *Forest and woodland ecology: an account of research being done in ITE*. Cambridge. ITE Symposium no. 8. NERC/Institute of Terrestrial Ecology: 85-88.
- MITCHELL, A. F. (1974):** A Field Guide to the Trees of Britain and Northern Europe. Collins. London. 254 S.
- MITSCHERLICH, G. (1975):** Wald, Wachstum und Umwelt: Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. Bd. 3: Boden, Luft und Produktion. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt am Main. 352 S.
- MOORE, A. M. (1986):** Temperature and moisture dependence of decomposition rates of hardwood and coniferous leaf litter. *Soil Biol. Biochem.* 18 (4): 427-435.
- MOREN, A.-S.; LINDROTH, A.; FLOWER-ELLIS, J.; CIENCIALA, E.; MÖLDER, M. (2000):** Branch transpiration of pine and spruce scaled to tree and canopy using needle biomass distributions. *Trees – Structure and Function* 14 (7): 384-397.
- MOU, P.; MITCHELL, R. J.; JONES, R. H. (1993):** Ecological field theory model: a mechanistic approach to simulate plant-plant interactions in southeastern forest ecosystems. *Can. J. For. Res.* 23: 2180-2193.

- MÜLLER, F. (2008):** Rote Liste Moose Sachsens. Naturschutz und Landschaftspflege. Hrsg. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Dresden. 60 S.
- MÜLLER, K. H. (2003):** Fine root dynamics in gaps of Norway spruce stands in the German Ore Mountains. *Forestry* 76 (2): 149-158.
- MÜLLER, K. H.; WAGNER, S. (2003):** Fine root dynamics in gaps of Norway spruce stands in the German Ore Mountains. *Forestry* 76 (2): 149-158.
- MURACH, D.; KLAPPROTH, F.; WIEDEMANN, H. (1993):** Feinwurzeluntersuchungen auf den Versuchsflächen des Dachexperimentes im Solling. *Forstarchiv* 64: 188-191.
- NAGEL, J. (2006):** <http://www.user.gwdg.de/~jnagel/cdft.html> (zuletzt geprüft am: 22.07.2011).
- NÄTHER, W.; WÄLDER, K. (2003):** Experimental design and statistical inference for cluster point processes. *Biom. J.* 45 (8): 1006-1022.
- NEBE, W. (1961):** Über präcenomane Böden auf osterzgebirgischen Gneisen. *Wiss. Zeitschrift TU Dresden* 10: 559-563.
- NEBE, W. (1964):** Die chemische Zusammensetzung der wichtigsten Grundgesteine Sachsens als Grundlage für eine Beurteilung der Nährstoffverhältnisse in Waldböden. *Jb. Staatl. Mus. Mineral. Geol.*: 351-386.
- NICKEL, E. (1987):** Besiedlung und Abbau von Buchenlaub durch die Bodenfauna – synökologische Untersuchungen an feuchten und trockenen Standorten des Naturparks Schönbuch. Dissertation. Universität Tübingen. 331 S.
- NIELSEN, C. CH. N.; MACKENTHUN, G. (1991):** Die horizontale Variation der Feinwurzelintensität in Waldböden in Abhängigkeit von der Bestockungsdichte. *Allg. Forst- und Jagd.-Ztg.* 162 (5/6): 112-119.
- NIHLGÅRD, B. (1970):** Vegetation types of planted spruce forest in Scania, southern Sweden. *Botaniska Notiser* 123: 310-337.
- NILSSON, M.-C.; WARDLE, D. A.; DAHLBERG, A. (1999):** Effects of plant litter species composition and diversity on the boreal forest plant-soil system. *Oikos* 86: 16-26.
- NOIRFALISE, A. (1967):** Ökologische Folgen eines intensiven Nadelholzanbaus in Laubwaldgebieten der gemäßigten Zone Europas. *Nat. Landsch.* 6: 123-125.
- NÖMMIK, H. (1978):** Mineralization of carbon and nitrogen in forest humus as influenced by additions of phosphat and lime. *Acta agric. Scand.* 28: 221-230.
- NORDÉN, U. (1994):** Influence of broad-leaved tree species on pH and organic matter content of forest topsoils in Scania, south Sweden. *Scand. J. For. Res.* 9: 1-8.
- NORDMANN, B. (2006):** Auswirkungen verschiedener Hiebsarten auf die Strahlungs- und Bodenfeuchteverhältnisse in Fichtenbeständen des Tharandter Waldes. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden. 85 S.
- ØKLAND, R. H.; RYDGREN, K.; ØKLAND, T. (1999):** Single-tree influence on understorey vegetation in a Norwegian boreal spruce forest. *Oikos* 87: 488-498.
- ÖRLANDER, G. (1993):** Shading reduces both visible and invisible frost damage to Norway spruce seedlings in the field. *Forestry* 66: 27-36.
- ÖRLANDER, G.; KARLSSON, C. (2000):** Influence of shelterwood density on survival and height increment of *Picea abies* advance growth. *Scand. J. For. Res.* 15: 20-29.
- PASSARGE, H. (1962):** Gliederung und Systematik der Kiefernforstgesellschaften im Hagenower Land. *Arch. Forstwes.* 11 (3): 275-308.
- PASSARGE, H. (1968):** Zur Ansprache des natürlichen Nadelholzanteils – Ein Beitrag zur Frage Waldgesellschaft-Forstgesellschaft. *Arch. Forstwes.* 17 (1): 17-31.
- PASSARGE, H.; HOFFMANN, G. (1964):** Soziologische Artengruppen mitteleuropäischer Wälder. *Arch. Forstwes.*, 13 (9): 913-937.
- PERSSON, H.; AHLSTRÖM, K. (1990/1991):** The effects of forest liming on fertilization on fine-root growth. *Water Air Soil Pollut.* 54 (3): 365-375.
- PLACHTER, H. (1991):** Naturschutz. UTB 1563. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart. 463 S.
- PRETZSCH, H. (1996):** Strukturvielfalt als Ergebnis waldbaulichen Handelns. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 167 (11): 213-221.

- PRETZSCH, H. (2009):** Produktivitätsrelation zwischen Fichte und Fichte/ Buche - Konsequenzen angesichts des Klimawandels. In: Fichtenwälder im Klimawandel. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Freising. Heftnummer 63: 44-55.
- PRIETZEL, J. (2004):** Humusveränderungen nach Einbringung von Buche und Eiche in Kiefernreinbestände. J. Plant Nutr. Soil Sci. 167: 428-438.
- PRIHA, O.; GRAYSTON, S. J.; HIUKKA, R.; PENNANEN, T.; SMOLANDER, A. (2001):** Microbial community structure and characteristics of the organic matter in soils under *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* at two forest sites. Biol. Fertil. Soils 33: 17-24.
- PRIHA, O.; SMOLANDER, A. (1999):** Nitrogen transformations in soil under *Pinus sylvestris*, *Picea abies* and *Betula pendula* at two forest sites. Soil Biol. Biochem. 31: 965-977.
- PUHE, J. (1994):** Die Wurzelentwicklung der Fichte (*Picea abies*) bei unterschiedlichen chemischen Bodenbedingungen. Ber. Forschungszentrums Waldökosysteme Universität Göttingen. Reihe A 108: 128 S.
- QUIAN, X. M.; KOTTKE, I.; OBERWINKLER, F.; KREUTZER, K.; WEISS, T. (1998):** Influence of liming and acidification on the activity of the mycorrhizal communities in a *Picea abies* (L.) Karst. Stand. Plant Soil 199: 99-109.
- RASPE, S. (1992):** Biomasse und Mineralstoffgehalte der Wurzeln von Fichtenbeständen (*Picea abies* Karst.) des Schwarzwaldes und Veränderungen nach Düngung. Freiburger Bodenkundl. 29: 197 S.
- RASPE, S.; FEGER, K.-H. (1997):** Wechselwirkungen zwischen mikrobieller Aktivität und Nährstofffreisetzung während der Streuzersetzung in Waldböden mit unterschiedlichem Wasserhaushalt. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 85 (2): 583-586.
- RASPE, S.; LORENZ, K.; FEGER, K.-H. (1996):** Bodenmikrobiologische Aktivität und Nährstofffreisetzung während der Streuzersetzung in Fichtenwäldern. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 81: 179-182.
- REHFUESS, K. E. (1986):** Wirkungen des Fichtenreinanbaus auf Bodeneigenschaften (Kap. 3.4). In: SCHMIDT-VOIGT, H. (1986): Die Fichte. Bd. II/1 Wachstum, Züchtung, Boden, Umwelt, Holz, Paul Parey, Hamburg. 563 S.
- REHFUESS, K. E. (1990):** Waldböden: Entwicklung, Eigenschaften und Nutzung. 2. Aufl. Pareys Studentexte. Paul Parey Verlag. Berlin und Hamburg. 294 S.
- REIF, A. (2000):** Das naturschutzfachliche Kriterium der Naturnähe und seine Bedeutung für die Waldwirtschaft. Z. Ökol. u. Naturschutz 8: 239-250.
- RIBBENS, E.; SILANDER, J. A.; PACALA, S. W. (1994):** Seedling recruitment in forests: calibrating models to predict patterns of tree seedling dispersion. Ecology 75 (6): 1794-1806.
- ITTERSHOFER, B. (2000):** Die verborgenen Ressourcen der Birken. AFZ - Der Wald 23: 1284-1289.
- RODENKIRCHEN, H. (1998):** Evidence for a nutritional disorder of *Oxalis acetosella* L. on acid forest soils. II. Diagnostic field experiments and nutrient solution studies. Plant Soil 199: 153-166.
- RÖHRIG, E.; BARTSCH, N.; v. LÜPKE, B. (2006):** Waldbau auf ökologischer Grundlage. Ulmer Verlag. Stuttgart. 479 S.
- ROTHER, A. (1997):** Einfluss des Baumartenanteils auf Durchwurzelung, Wasserhaushalt, Stoffhaushalt und Zuwachsleistung eines Fichten-Buchen-Mischbestandes am Standort Höglwald. Schriftenr. d. Forstw. Fak. d. Univ. München u. d. Bayer. Landesanst. f. Wald und Forstw. 163. 174 S.
- ROTHER, A.; BINKLEY, D. (2001):** Nutritional interactions in mixed species forests: a synthesis. Can. J. For. Res. 31: 1855-1870.
- ROTHMALER, W. (2002):** Exkursionsflora von Deutschland. Gefäßpflanzen: kritischer Bd. 9. Aufl. JÄGER, E. J.; WERNER, K. (Hrsg.). Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. Berlin. 948 S.
- RYAN, P. J.; MCGARITY, J. W. (1983):** The nature and spatial variability of soil properties adjacent to large forest eucalypts. Soil Sci. Soc. Am. J. 47: 286-293.
- SACHS, L. (1999):** Angewandte Statistik. Springer Verlag. Berlin. 883 S.
- SAETRE, P. (1998):** Decomposition, microbial community structure, and earthworm effects along a birch-spruce soil gradient. Ecology 79 (3): 834-846.
- SAETRE, P. (1999):** Spatial patterns of ground vegetation, soil microbial biomass and activity in a mixed spruce-birch stand. Ecology 72: 183-192.
- SAETRE, P.; BÅÅTH, E. (2000):** Spatial variation and patterns of soil microbial community structure in a mixed spruce – birch stand. Soil Biol. Biochem. 32: 909-917.

- SAETRE, P.; BRANDTBERG, P.-O.; LUNDKVIST, H.; BENGTSOON, J. (1999):** Soil organisms and carbon, nitrogen and phosphorus mineralisation in Norway spruce and mixed Norway spruce – Birch stands. *Biol. Fertil. Soils* 28: 382-388.
- SAETRE, P.; STURESSON SAETRE, L.; BRANDTBERG, P.-O.; LUNDKVIST, H.; BENGTSOON, J. (1997):** Ground vegetation composition in pure Norway spruce and mixed Norway spruce – birch stands. *Can. J. For. Res.* 27: 2034-2042.
- SAMEC, P.; VAVŘÍČEK, D.; ŠIMKOVÁ, P.; PŇÁČEK, J. (2007):** Multivariate statistical approach to comparison of the nutrient status of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and top-soil properties in differently managed forest stands. *J. For. Sci.* 53 (3): 101-112.
- SAUER, D. (2002):** Genese, Verbreitung und Eigenschaften periglazialer Lagen im Rheinischen Schiefergebirge - anhand von Beispielen aus Westerwald, Hunsrück und Eifel. *Boden und Landschaft* 36. 294 S.
- SCHEITHAUER, U. (2008):** Zuschnitt- und Packungsoptimierung. Problemstellungen, Modellierungstechniken, Lösungsmethoden. Vieweg + Teubner Verlag. 338 S.
- SCHEU, S. (2005):** Linkages between tree diversity, soil fauna and ecosystem processes. In: SCHERER-LORENZEN, M.; KÖRNER, Ch.; SCHULZE, E.-D. (Eds.): *Forest Diversity and Function: Temperate and Boreal Systems*. Springer Verlag. Berlin und Heidelberg. *Ecological Studies* 176 (D): 211-233.
- SCHIRMER, R. (2000):** Birke – Vermehrungskünstler und Überlebensstrategie. In: *Beiträge zur Sandbirke. Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Freising. Heftnummer 28: 19-23.*
- SCHMIDT, A. (1968):** Der rechnerische Ausgleich der Bestandeshöhenkurven. *Forstwissenschaftl. Centralblatt*: 370-382.
- SCHMIDT, M.; EWALD, J.; FISCHER, A.; v. OHEIMB, G.; KRIEBITZSCH, W.-U.; SCHMIDT, W.; ELLENBERG, H. (2003):** Liste der in Deutschland typischen Waldgefäßpflanzen. *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg Nr. 212. Kommissionsverlag Max Wiedebusch. Hamburg. 77 S.*
- SCHMIDT, P. A. (2000):** Die Entwicklung der Landschaft unter Berücksichtigung veränderter Landnutzungen aus geobotanischer Sicht. In: *Landnutzungsplanung und Naturschutz – Aktuelle Forschungsberichte. Wissenschaft und Technik Verlag. Berlin: 22-40.*
- SCHMIDT, P. A.; HEMPEL, W.; DENNER, M.; DÖRING, N.; GNÜCHTEL, A.; WALTER, B.; WENDEL, D. (2002):** Potentielle Natürliche Vegetation Sachsens mit Karte 1:200.000. In: *SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (Hrsg.): Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege. Dresden. 230 S.*
- SCHMIDT, W. (1992):** Der Einfluß von Kalkungsmaßnahmen auf die Waldbodenvegetation. *Z. Ökol. u. Naturschutz* 1: 79-88.
- SCHMIDT, W. (2002):** Einfluss der Bodenschutzkalkung auf die Waldvegetation. *Forstarchiv* 73: 43-54.
- SCHMIDT, W.; WECKESSER, M. (2001):** Struktur und Diversität der Waldvegetation als Indikatoren für eine nachhaltige Waldnutzung. *Forst und Holz* 56 (15): 493-498.
- SCHOBBER, R. (1995):** Ertragstabellen wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung / bearb. von Reinhard Schober. 4. Aufl. Sauerländer Verlag. Frankfurt am Main. 166 S.
- SCHOBBER, S. (2009):** Einfluss von einzelbaumweise eingemischten Sand-Birken (*Betula pendula* ROTH) auf die mikrobielle Biomasse im Boden eines Fichtenbestandes (*Picea abies* (L.) KARST) im Mittleren Erzgebirge. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden. 85 S.
- SCHRÖDTER, H.; TIETJEN, C. (1971/1972):** Statistische Betrachtungen zur Frage der Abhängigkeit der Nitrifikation von Bodentemperatur und Bodenfeuchtigkeit. *Argicultural Meteorology* 9: 77-91.
- SCHUA, K.; FISCHER, H.; LEHMANN, B.; WAGNER, S. (2007):** Wirkungen einzelbaumweise eingemischter Trauben-Eichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) auf den Oberbodenzustand in Kiefernbeständen (*Pinus sylvestris* L.). *Allg. Forst- und Jagd.-Ztg.* 178 (9/10): 172-179.
- SCHWANECKE, W.; KOPP, D. (1996):** Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke im Freistaat Sachsen. *Schr.-R. Sächs. Landesanst. Forsten* 8. Graupa. 191 S.
- SCHWARZ, G. (1978):** Estimating the Dimension of a Model. In: *Annals of Statistics*: 461-464.

- SEIBT, G.; WITTICH, W.; REEMTSMA, J. B. (1977):** Ertragskundliche und bodenkundliche Ergebnisse langfristiger Kalkungsversuche im nord- und westdeutschen Bergland. Schriftenr. Forstl. Fak. Univ. Göttingen 50. 298 S.
- SILFVER, T.; MIKOLA, J.; ROUSI, M.; ROININEN, H.; OKSANEN, E. (2007):** Leaf litter decomposition differs among genotypes in a local *Betula pendula* population 152: 707-714.
- SILFVER, T.; ROININEN, H.; OKSANEN, E.; ROUSI, M. (2009):** Genetic and environmental determinants of silver birch growth and herbivore resistance. For. Ecol. Manage. 257 (10): 2145-2149.
- SIMMONS, E. A.; BUCKLEY, G. P. (1992):** Ground vegetation under planted mixtures of trees. In: CANNEL, M. G. R.; MALCOLM, D. C.; ROBERTSON, P. A. (1992): The Ecology of Mixed-Species Stands of Trees. Special publications. Nr. 11 of the British Ecological Society. Blackwell Scientific Publications London. Oxford: 211-231.
- SIREN, G. (1955):** The development of spruce forest on raw humus sites in northern Finland and its ecology. Acta For. Fenn. 62 (4). Helsinki.
- SMOLANDER, A.; LOPONEN, J.; SUOMINEN, K.; KINTUNEN, V. (2005):** Organic matter characteristics and C and N transformations in the humus layer under two trees species, *Betula pendula* and *Picea abies*. Soil Biol. Biochem. 37: 1309-3442.
- SMUL [SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT] (2005):** Klimawandel in Sachsen - Sachstand und Ausblick. 1. Aufl. 111 S.
- SMUL [SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDWIRTSCHAFT] (2009):** Waldzustandsbericht 2009 – Wald unter der Lupe. 1. Aufl. 50 S.
- SPERBER, G. (2000):** Die Sandbirke im Werturteil des Deutschen Waldbaus: Betulamanie, Unholz, Pionier und Mischbaumart. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Freising - Weihenstephan. Bericht 28: 44-58.
- STAATSBETRIEB SACHSENFORST (2007):** Forstorganisatorische Gliederung von Sachsen. <http://www.silvportal.info/showImage?id=663> (zuletzt geprüft am: 14.07.2011).
- STÄDTLER, H. (1998):** Begleitende Pionierbaumarten des südniedersächsischen Berglandes: "Löwe - Waldbau" mit Birke, Aspe und Eberesche. AFZ - Der Wald 18: 959-961.
- STAELENS, J.; NACHTERGALE, L.; LUYSSAERT, S.; LUST, N. (2003):** A model of wind-influenced leaf litterfall in a mixed hardwood forest. Can. J. For. Res. 33: 201-209.
- STEINHAUS, H. (1999):** Mathematical Snapshots. 3rd ed. New York: Dover. p. 202.
- STERBA, H. (2004):** Equilibrium curves and growth models to deal with forests in transition to uneven-aged structure – application in two sample stands. Silva Fennica 38 (4): 413-423.
- STOYAN, D.; WAGNER, S. (2001):** Estimating the fruit dispersion of anemochorous forest trees. Ecol. Model. 145: 35-47.
- STRANDBERG, B.; KRISTIANSEN, S. M.; TYBIR, K. (2005):** Dynamic oak-scrub to forest succession: effects of management on understorey vegetation, humus forms and soils. For. Ecol. Manage. 211: 318-328.
- SUKOPP, H. (1972):** Wandel von Flora und Vegetation in Mitteleuropa unter Einfluss des Menschen. Ber. Landw. 50: 112-139.
- TAMM, C. O.; PETERSON, A. (1969):** Studies on nitrogen mobilization in forest soils. Stud. for. suec. 75: 1-39.
- THAM, Å. (1988):** Yield prediction after heavy thinning of birch in mixed stands of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) and birch (*Betula pendula* Roth & *Betula pubescens* Ehrh.). Doctoral thesis. Dept of Forestry Yield Research. Swedish University of Agricultural Sciences. Report no. 23. 36 S.
- THAM, Å. (1994):** Crop plans and yield predictions for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and birch (*Betula pendula* Roth & *Betula pubescens* Ehrh.) mixtures. Department of Forest Yield Research. Swedish University of Agricultural Sciences. Faculty of Forestry Uppsala. Schweden: 1-21.
- THOMASIUS, H. (1991):** Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf die Wälder in Mitteleuropa. Fortsw. Cbl. 110: 305-330.
- TICHOMIROWA, M. (2003):** Die Gneise des Erzgebirges – hochmetamorphe Äquivalente von neoproterozoisch – frühpaläozoischen Grauwacken und Granitoiden der Cadomiden. Habilitationsschrift. Freib. Forschungsheft C 495. 222 S.

- TINYA, F.; MÁRIALIGETI, S.; KIRÁLY, I.; NÉMETH, B.; ÓDOR, P. (2009):** The effect of light conditions on herbs, bryophytes and seedlings of temperate mixed forests in Órség, Western Hungary. *Plant Ecol* 204: 69-81.
- TISCHER, A. (2008):** Beitrag zur Kenntnis der Moosflora der Dahleener Heide. Bachelorarbeit an der Technischen Universität Dresden. 123 S.
- TISCHER, A. (2009):** Untersuchungen zu Wirkungen eingemischter Sand-Birken (*Betula pendula* ROTH) in Wäldern der Gemeinen Fichte (*Picea abies* (L.) KARST.) auf Oberbodenstruktur, Oberbodenfeuchte und Bodenvegetation. Masterarbeit an der Technischen Universität Dresden. 137 S.
- TJURIN (1956):** Birken-Ertragstafel - UDSSR. Auszugsweise im Landesamt für Forstplanung. Malchin.
- TJURIN, A. W.; NAUMENKO, I. M. (1956):** Forstliches Hilfsbuch für Walddaxation. Moskva.
- TRANQUILLINI, W. (1960):** Das Lichtklima wichtiger Pflanzengesellschaften. *Handb. d. Pflanzenphys.* 5 (2): 304-338.
- TÜXEN, R. (1950):** Neue Methoden der Wald- u. Forstkartierung. *Mitt. Florist.-Soziol. Arbeitsgem. N.F.* 2: 217-219.
- UNSELD, R.; WENZEL, M.; WEICH, T.; STARK, H.; WEINREICH, A.; BAUHUS, J. (2010):** Energie-Vorwälder in Südwestdeutschland – Alternative Bewirtschaftungsformen zur Steigerung der energetisch nutzbaren Biomasse im Wald. *Forst und Holz* 65 (10): 14-17.
- UTSCHICK, H.; AMMER, U. (2003):** Die Mischung macht's. *Waldnaturschutz – Neues zur Bedeutung der Mischungsform.* LWFaktuell (Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft). Freising. Heftnummer 40: 19-21.
- UZAKBAEVA, J. (2005):** Effect of different tree species on soil quality parameters in forest plantations of Kyrgyzstan. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. 106 S.
- VALKONEN, S.; VALSTA, L. (2001):** Productivity and economics of mixed two-storied spruce and birch stands in Southern Finland simulated with empirical models. *For. Ecol. Manage.* 140: 133-149.
- VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. (1987):** An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 19: 703-707.
- WAGNER, S. (1994):** Strahlungsschätzungen in Wäldern durch hemisphärische Fotos – Methode und Anwendung. *Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme.* Göttingen. 166 S.
- WAGNER, S. (1995):** Übertragung strahlungsrelevanter Wetterinformationen aus punktuellen PAR-Sensordaten in größere Versuchsflächenanlagen mit Hilfe hemisphärischer Fotos. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 167 (1/2): 34-40.
- WAGNER, S. (1997):** Ein Modell zur Fruchtausbreitung der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) unter Berücksichtigung von Richtungseffekten. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 168 (8): 149-155.
- WAGNER, S. (1998):** Calibration of grey values of hemispherical photographs for image analysis. *Agric. For. Meteorol.* 90 (1/2): 103-117.
- WAGNER, S. (2005):** Einzelbaumeffekte – eine Methode zur ökologischen Forschung in Mischbeständen. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung.* In: BAUHUS, J.; CSAPEK, G. (2005): Beiträge zur Tagung 2004 der Sektion Waldbau DVFFA 60: 127-139.
- WAGNER, S. (2006):** Techniken zur Integration verschiedener Waldfunktionen und die Nachhaltigkeitsbasis: Gibt es ein Leitbild für oligofunktionale Waldbewirtschaftung? XVI. Veranstaltung vom 4.-6.10. in Kutna Hora. (Hrsg.) Petr Kantor: Selbstverlag Mendel-Universität für Land- und Forstwirtschaft. Brno: 3-19.
- WAGNER, S. (2008):** Klimawandel - Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. *AFZ - Der Wald* 63 (20): 1104-1107.
- WAGNER, S.; FISCHER, H.; HUTH, F. (2011):** Canopy effects on vegetation caused by harvesting and regeneration treatments. *Eur. J. Forest. Res.* 130: 17-40.
- WAGNER, S.; WÄLDER, K.; RIBBENS, E.; ZEIBIG, A. (2004):** Directionality in fruit dispersal models for anemochorous forest trees. *Ecol. Model.* 179: 487-498.
- WÄLDER, K.; FRISCHBIER, N.; BREDEMEIER, M.; NÄTHER, W.; WAGNER, S. (2008):** Analysis of Of-layer humus mass variation in a mixed stand of European beech and Norway spruce: An application of Structural Equation Modelling. *Ecol. Model.* (213): 319-330.
- WÄLDER, K.; NÄTHER, W.; WAGNER, S. (2009):** Improving inverse model fitting in trees – Anisotropy, multiplicative effects, and Bayes estimation. *Ecol. Model.* 220: 1044-1053.



- WALLRUP, E.; SAETRE, P.; RYDIN, H. (2006):** Deciduous trees affect small-scale floristic diversity and tree regeneration in conifer forests. *Scan. J. For. Res.* 21: 399-404.
- WEIDEMANN, G.; SCHAUERMANN, J. (1986):** Die Tierwelt, ihre Nahrungsbeziehungen und ihre Rolle. In: ELLENBERG, H.; MAYER, R.; SCHAUERMANN, J. (Eds.): *Ökosystemforschung - Ergebnisse des Solling-Projektes*. Ulmer Verlag. Stuttgart: 179-266.
- WENDT, P.; SCHMIDT, W. (2000):** Auswirkungen der Kalkungsmaßnahmen auf die Vegetation von Kiefernwäldern in der Lüneburger Heide (NW-Deutschland). *Forst und Holz* 55 (1): 9-14.
- WESSOLEK, G. (2001):** Bestimmung von Wasserhaushaltskomponenten in Waldökosystemen. Probleme und Erfahrungen. *Beitr. Forstwirtsch. und Landsch.ökol.* 35 (1): 2-4.
- v. WILPERT, K. MIES, E. (1995):** The Influence of Stand Structure and Tree Species on Mineral Cycling. In: NILSSON, L. D.; HÜTTL, R. F.; JOHANSSON, U. T.; MATHY, P. (Eds.): *EC Ecosystems Report 21*: 267-276.
- WITTICH, W. (1961):** Der Einfluss der Baumart auf den Bodenzustand. *Allg. Forstzeitschrift* 16 (2): 41-45.
- WITTICH, W. (1964):** Die Bedeutung der Humusform für die Ernährung des Waldes und die Entwicklung seiner Böden. *Allg. Forstzeitschrift* 19 (3): 29-33.
- WITTKOPF, S. (1995):** Wurzelintensität im Fichten-Buchen-Mischbestand im Vergleich zum Reinbestand. Untersuchungen zur Wurzelintensität im Fichtenreinbestand, Buchenreinbestand und Mischbestand mittels Bohrkernmethode unter Berücksichtigung bodenchemischer Parameter. Diplomarbeit. Ludwig-Maximilians Universität München. 74 S.
- WOLFF, B.; RIEK, W. (1997):** Deutscher Waldbodenbericht 1996 – Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE). Bd. 1 und 2. BMELF. 144 S. und 259 S.
- WOLTERS, V. (1996):** Fortschritt der Bodenzoologie: Probleme, Konzepte, Lösungsstrategien. In: *Neue Konzepte in der Bodenbiologie*. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 81: 7-16.
- WU, H.; SHARPE, P. J. H.; WALKER, J.; PENTRIGE, L. K. (1985):** Ecological field theory: a spatial analysis of resource interference among plants. *Ecol. Model.* 29: 215-243.
- WUNDERLICH, S.; RABEN, G.; ANDREAE, H.; FEGER, K. H. (2006):** Schwefel-Vorräte und Sulfat-Remobilisierungspotenzial in Böden der Level-II-Standorte Sachsens. *AFZ - Der Wald* 60: 762-765.
- v. WYL, B.; HÄFLINGER, P.; BAGGENSTOS, M. (2003):** Pflanzensoziologische Kartierung der Luzerner Wälder – Kommentar Waldbau. Kantonsforstamt Luzern. 228 S.
- ZELLES, L.; STEPPER, K.; ZSOLNAY, A. (1990):** The effect of lime on microbial activity in spruce forests. *Biol. Fertil. Soils* 9: 78-82.
- ZERBE, S. (1993):** Fichtenforste als Ersatzgesellschaften von Hainsimsen-Buchenwäldern. Vegetation, Struktur und Vegetationsveränderungen eines Forstökosystems. *Ber. Forschungszentr. Waldökosyst., Reihe A*. 100. 173 S.
- ZERBE, S.; MEIWES, K. J. (2000):** Zum Einfluß von Weichlaubhölzern auf Vegetation und Auflagehumus von Fichtenforsten – Untersuchungen in einem zwei Jahrzehnte alten Birken-Ebereschen-Vorwald im Hoch-Solling. *Forstw. Cbl.* 119: 1-19.
- ZERBE, S.; SUKOPP, H. (1995):** Gehören Forste zur Vegetation? Definition und Abgrenzung eines vegetationskundlichen und kulturhistorischen Begriffes. *Tuexenia* 15: 11-24.
- ZEZSCHWITZ, E. von (1985):** Qualitätsänderung des Waldhumus. *Forstw. Cbl.* 104: 205-220.
- ZINKE, P. J. (1962):** The pattern of influence of individual forest trees on soil properties. *Ecology* 43 (1): 130-133.
- ZINKE, P. J.; CROCKER, R. L. (1962):** The influence of giant sequoia on soil properties. *For. Sci.* 8: 2-11.

## **9. Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1: Karte des Freistaates Sachsen (Quelle: STAATSBETRIEB SACHSENFORST 2007) und Luftbilder des Untersuchungsbestandes (Quelle: GOOGLE EARTH 2008, verändert).....	8
Abb. 2: Darstellung der Abteilung 80 auf der topographischen Karte 1:25000 (Quelle: LANDESMESSENGESAMT SACHSEN 2004).....	9
Abb. 3: Monatsmittel der Lufttemperatur [°C] der Waldklimastation Olbernhau, Zeitraum 2002 bis 2008 (Datenquelle: Staatsbetrieb Sachsenforst) .....	10
Abb. 4: Monatssummen des Niederschlags [mm] für die Waldklimastation Olbernhau, Zeitraum 2002 bis 2008 (Datenquelle: Staatsbetrieb Sachsenforst).....	10
Abb. 5: Verteilung der Waldgesellschaften im sächsischen Mittelgebirgsraum unter gegenwärtigen Umweltbedingungen (Quelle: SMUL 2005).....	12
Abb. 6: a) Schwach podsolige Braunerde, b) Stark podsolige Braunerde, c) Braunerde-Podsol ...	14
Abb. 7: Schematische Darstellung der Anlage von Transekten, auf denen die Probepunkte .....	19
Abb. 8: Schema für ein multiples Modell .....	21
Abb. 9: Stamm- und Strahlungspunkteverteilungsplan bei einzelbaumweiser Einmischung von Birke in Fichte (nicht maßstabsgetreu) .....	26
Abb. 10: Stamm- und Strahlungspunkteverteilungsplan der Fichtenfläche (nicht maßstabsgetreu)	27
Abb. 11: Stamm- und Probepunkteverteilungsplan für die Bodenvegetationsansprache bei einzelbaumweiser Einmischung von Birke in Fichte mit den Transektnummern 101 bis 105 .....	32
Abb. 12: Stamm- und Probepunkteverteilungsplan für die Bodenvegetationsansprache in reiner Fichte mit den Transektnummern 201 bis 204 (nicht maßstabsgetreu).....	33
Abb. 13: Rahmen zur Unterstützung der Vegetationsansprache.....	33
Abb. 14: Beispiel für die Anordnung der Streufänge entlang von Transekten .....	36
Abb. 15: Stamm- und Streufallenverteilungsplan bei einzelbaumweiser Einmischung von Birke in Fichte (nicht maßstabsgetreu).....	37
Abb. 16: Erweiterter Stamm- und Fallenverteilungsplan (nicht maßstabsgetreu) .....	38
Abb. 17: Darstellung einer isotropen Verteilung mit Isolinien .....	40
Abb. 18: Beispiel für anisotrope Verteilungen .....	42
Abb. 19: a) Schematische Darstellung der üblichen Gradeinteilung nach Himmelsrichtungen und b) Schematische Darstellung für WaldStat verwendete mathematische Betrachtung (zirkuläre Statistik) im zweidimensionalen Raum, ausgehend von der Position eines Zentralbaumes und der davon abhängigen Ablagerungsposition der Streu (Ausbreitungsdistanz $r$ und Ausbreitungsrichtung definiert durch $\varphi = \phi_i$ ).....	43
Abb. 20: Schematische Darstellung eines Litter-Bag-Blocks mit Temperaturmessgerät in der Mitte (blau eingefärbter Kreis) mit farblicher Übereinstimmung der Varianten zu Tab. 15 sowie Fotografie eines Litter-Bag-Blocks im Bestand mit Temperaturmessgerät.....	47
Abb. 21: HOBO® H8 Pro Temperatur Logger (ø 8 cm) .....	48

Abb. 22: Stamm- und Bodenprobenverteilungsplan bei einzelbaumweiser Einmischung von Birke in Fichte (nicht maßstabsgetreu).....	52
Abb. 23: Stamm- und Probepunkteverteilungsplan für die biologische Aktivität (Basalatmung, $C_{mic}$ und $N_{mic}$ ) mit den Transektnummern 1 bis 3 (nicht maßstabsgetreu) .....	53
Abb. 24: a) Baumhöhen der Fichten-Birken-Fläche sowie b) Strahlung der Fichten-Birken-Fläche (die gelben Kreise markieren die Birken) .....	54
Abb. 25: a) Baumhöhen der Fichten-Fläche sowie b) Strahlung der Fichten-Fläche .....	55
Abb. 26: Korrelation, Bestimmtheitsmaß und Variationskoeffizient von PACL/PARSF in Prozent für die Fichten-Birken-Fläche .....	57
Abb. 27: Korrelation, Bestimmtheitsmaß und Variationskoeffizient von PACL/PARSF in Prozent für die Fichten-Fläche .....	57
Abb. 28: a) Sippenanzahl der Kraut- und Moosschicht des Transektes Fichte-Birke 1 (positive Distanzen = Nordwest = Transekt 102; negative Distanzen = Südost = Transekt 104) sowie b) Sippenanzahl der Kraut- und Moosschicht des Transektes Fichte-Birke 2 (positive Distanzen = Nordwest = Transekt 103; negative Distanzen = Südost = Transekt 105) .....	60
Abb. 29: Sippenanzahl der Kraut- und Moosschicht Transekt Fichte .....	61
Abb. 30: Legende a) für die Artmächtigkeitsdarstellung und Sippenanzahl in Abb. 31 und 32 sowie b) der Deckungsgrade der Kraut- und Moosschicht in Abb. 31 und 32, in Anlehnung an TISCHER (2009).....	62
Abb. 31: Vegetationskarte Transekt Fichte-Birke 1, Artmächtigkeit sowie Sippenanzahl und .....	63
Abb. 32: Vegetationskarte Transekt Fichte, Artmächtigkeit sowie Sippenanzahl und Deckungsgrade (positive Distanzen = West; negative Distanzen = Südost), in Anlehnung an TISCHER (2009) .....	64
Abb. 33: Häufigkeit der Sippenanzahl für die Kraut- und Moosschicht in den drei Straten .....	67
Abb. 34: PCA-Ordinationsdiagramme der Artmächtigkeit für die Krautschicht mit Sippen, Aufnahmepunkten und mittleren Zeigerwerten ( $mL$ = mittlere Lichtzahl, $mF$ = mittlere Feuchtezahl, $mR$ = mittlere Reaktionszahl und $mN$ = mittlere Nährstoffzahl), Berechnung für die Achsen 1 und 2 a) mit absoluten Werten in Anlehnung an TISCHER (2009) und b) mit standardisierten Werten ...	68
Abb. 35: PCA-Ordinationsdiagramme der Artmächtigkeit für die Krautschicht mit Sippen, Aufnahmepunkten und mittleren Zeigerwerten ( $mL$ = mittlere Lichtzahl, $mF$ = mittlere Feuchtezahl, $mR$ = mittlere Reaktionszahl und $mN$ = mittlere Nährstoffzahl), Berechnung für die Achsen 1 und 3 mit standardisierten Werten .....	69
Abb. 36: a) Qualitatives Waldartenspektrum der Krautschicht und b) Quantitatives Waldartenspektrum der Krautschicht (unter Berücksichtigung der Stetigkeiten) jeweils nach (SCHMIDT et al. 2003).....	72
Abb. 37: Relative Häufigkeit der mittleren Lichtzahl der Krautschicht (KS) für die drei Straten .....	73
Abb. 38: Relative Häufigkeit der mittleren Feuchtezahl der Krautschicht (KS) für die drei Straten .	74
Abb. 39: Relative Häufigkeit der mittleren Reaktionszahl der Krautschicht (KS) für die drei Straten.....	75
Abb. 40: Relative Häufigkeit der mittleren Stickstoffzahl der Krautschicht für die drei Straten .....	76

Abb. 41: Deckungsgrad der Kraut- (KS) und Moosschicht (MS) nach Straten .....	78
Abb. 42: Sippenanzahl der Kraut- und Moosschicht a) unter Fichte-Birke sowie b) unter reiner Fichte, Position des Zentralstammes jeweils bei $x = 0$ und $y = 0$ .....	80
Abb. 43: Sippenanzahl der Krautschicht a) unter Fichte-Birke sowie b) unter reiner Fichte, Position des Zentralstammes jeweils bei $x = 0$ und $y = 0$ .....	80
Abb. 44: Sippenanzahl der Moosschicht a) unter Fichte-Birke sowie b) unter reiner Fichte, Position des Zentralstammes jeweils bei $x = 0$ und $y = 0$ .....	81
Abb. 45: Stamm- und Probepunkteverteilungspläne für die Bodenvegetationsansprache a) bei einzelbaumweiser Einmischung von Birke in Fichte sowie b) von reiner Fichte.....	81
Abb. 46: Deckungsgrad der Kraut- und Moosschicht zusammen a) unter Fichte-Birke sowie b) unter reiner Fichte, Position des Fichtenzentralstammes jeweils bei $x = 0$ und $y = 0$ .....	83
Abb. 47: Deckungsgrad der Krautschicht a) unter Fichte-Birke sowie b) unter reiner Fichte, Position des Zentralstammes jeweils bei $x = 0$ und $y = 0$ .....	83
Abb. 48: Deckungsgrad der Moosschicht a) unter Fichte-Birke sowie b) unter reiner Fichte, Position des Zentralstammes jeweils bei $x = 0$ und $y = 0$ .....	84
Abb. 49: Birkentrockenmassen in Abhängigkeit von der Entfernung zur Zentralbirke.....	85
Abb. 50: Flusssichten der Birkenblätter-Trockenmassen aus der Modellierung a) mit 9 Birken und 65 Fallen und b) mit 40 Birken und 137 Fallen .....	88
Abb. 51: Prozentuale Verteilung der Windrichtung gemessen auf der Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau (Staatsbetrieb Sachsenforst) a) für den Zeitraum 13.09.2007 bis 18.12.2007, mittlere Windgeschwindigkeit: 1,10 m/s, maximale Windgeschwindigkeit: 3,90 m/s, b) für den Zeitraum 01.09.2007 bis 30.09.2008, mittlere Windgeschwindigkeit: 0,93 m/s, maximale Windgeschwindigkeit: 3,20 m/s.....	89
Abb. 52: Prozentuale Verteilung der Windrichtung für den Zeitraum 01.01.1997 bis 31.05.2009 gemessen auf der Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau (Staatsbetrieb Sachsenforst), mittlere Windgeschwindigkeit: 1,51 m/s, maximale Windgeschwindigkeit: 6,41 m/s.....	90
Abb. 53: Trockenmassenverlust [%] a) der Birkenblätter und b) der Fichtennadeln aus den Litter-Bags in den drei Straten.....	92
Abb. 54: C/N-Verhältnisse der Birkenblätter und der Fichtennadeln aus den Litter-Bags in den drei Straten.....	94
Abb. 55: Verlauf der mittleren Stundentemperatur des Loggers unter der Birkenkrone für das Jahr 2008, Max. 32,3°C und Min. -8,9°C .....	96
Abb. 56: Verlauf der mittleren Stundentemperatur des Loggers unter Fichte-Birke für das Jahr 2008, Max. 29,1°C und Min. -8,4°C .....	96
Abb. 57: Verlauf der mittleren Stundentemperatur des Loggers unter reiner Fichte für das Jahr 2008, Max. 40,1°C und Min. -8,9°C .....	96
Abb. 58: Mächtigkeit a) des Of-Horizontes und b) des Oh-Horizontes jeweils für Fichte-Birke (positive Distanzen = Nordwest = Transekt 102; negative Distanzen = Südost = Transekt 104)....	98
Abb. 59: Mächtigkeit a) des Of-Horizontes und b) des Oh-Horizontes jeweils für Fichte (positive Distanzen = West = Transekt 201; negative Distanzen = Südost = Transekt 204) .....	99

Abb. 60: Gesamtmächtigkeit a) für Fichte-Birke (positive Distanzen = Nordwest = Transekt 102; negative Distanzen = Südost = Transekt 104) und b) für reine Fichte.....	100
Abb. 61: Semivariogramm der Of-Mächtigkeit entlang des Fichten-Birken-Transektes (n. TISCHER 2009).....	101
Abb. 62: Semivariogramm der Of-Mächtigkeit entlang des Fichten-Transektes (n. TISCHER 2009).....	101
Abb. 63: Verteilung der Humusformen innerhalb der drei Straten .....	103
Abb. 64: Darstellung unterschiedlicher bodenchemischer und bodenphysikalischer Eigenschaften des Of-Horizontes für ein Transekt, in Anlehnung an SCHÖBER (2009).....	106
Abb. 65: Darstellung unterschiedlicher bodenchemischer und bodenphysikalischer Eigenschaften des Oh-Horizontes für ein Transekt, in Anlehnung an SCHÖBER (2009).....	107
Abb. 66: Darstellung unterschiedlicher bodenchemischer und bodenphysikalischer Eigenschaften des A-Horizontes für ein Transekt, in Anlehnung an SCHÖBER (2009) .....	108
Abb. 67: Box-Whisker-Plots der pH-Werte a) in KCl und b) in H <sub>2</sub> O .....	109
Abb. 68: Box-Whisker-Plots des C <sub>org</sub> /N-Verhältnisses .....	110
Abb. 69: Box-Whisker-Plots a) der C-Gesamtgehalte sowie b) der C-Gesamtvorräte .....	111
Abb. 70: Box-Whisker-Plots a) des carbonatischen Kohlenstoffgehaltes und b) des organischen Kohlenstoffgehaltes (gelb: Birken-Stratum, orange: Fichten-Birken-Stratum, grün: Fichten-Stratum).....	112
Abb. 71: Box-Whisker-Plots a) der N-Gesamtgehalte sowie b) der N-Gesamtvorräte .....	113
Abb. 72: Box-Whisker-Plots a) des mikrobiellen Kohlenstoffgehaltes sowie b) des mikrobiellen Kohlenstoffvorrates; (gelb: Birken-Stratum, orange: Fichten-Birken-Stratum, grün: Fichten-Stratum).....	114
Abb. 73: Box-Whisker-Plots a) des mikrobiellen N-Gehaltes sowie b) des mikrobiellen N-Vorrates; (gelb: Birken-Stratum, orange: Fichten-Birken-Stratum, grün: Fichten-Stratum).....	115
Abb. 74: Mikrobieller Biomasse-C im Verhältnis zum mikrobiellen Biomasse-N für a) den Of-Horizont, b) den Oh-Horizont und c) den A-Horizont .....	116
Abb. 75: a) Basalatmungsaktivität der drei Straten in den drei Horizonten, b) Metabolischer Quotient (qCO <sub>2</sub> ) der drei Straten in den drei Horizonten .....	117
Abb. 76: PCA-Ordinationsdiagramm für die Elementgehalte aus dem Königswasseraufschluss, die pH-Messung (KCl) sowie die Gehalte aus den C- und N-Analysen für den Of-Horizont der drei Straten mit a) absoluten Werten sowie b) standardisierten Werten.....	119
Abb. 77: PCA-Ordinationsdiagramm für die absoluten Elementgehalte aus dem Königswasseraufschluss, pH-Messung (KCl) sowie die Gehalte aus den N-Analysen für den Of-Horizont für die absoluten Werte.....	120
Abb. 78: mittlere Kationenaustauschkapazität [µeq/g] mit den dazugehörigen prozentualen Anteilen der BaCl <sub>2</sub> -extrahierbaren Kationen an der AK <sub>eff</sub> in den einzelnen Oberbodenhorizonten für die drei Straten.....	121

Ab. 79: PCA-Ordinationsdiagramme der Kationenaustauschkapazität des A-Horizontes, Berechnung a) mit absoluten Werten und b) mit standardisierten Werten .....	122
Abb. 80: Hypothesen über den Effekt der Mischung zweier Arten auf ihre Produktivität in schematischer Darstellung aus PRETZSCH (2009); auf der linken und rechten y-Achse ist die Produktivität der Art 1 bzw. 2 ( $p_1$ , $p_2$ ) im Reinbestand angegeben. Die x-Achse gibt den Mischungsanteil an. Liegt die Produktivität eines Mischbestandes auf der geraden Verbindungslinie (gestrichelt), so handelt es sich um einen neutralen Ersatzeffekt, liegt die Produktivität auf der von unten gesehen konkaven Linie (durchgezogen), so zeigt das einen Mehrzuwachs gegenüber dem Reinbestand an. Liegt die Produktivität dagegen auf der von unten gesehen konvexen Linie (punktiert), so war der Zuwachs gemindert. ....	146
Abb. 81: Einflussbereich und Anordnung der einzelbaumweise eingemischten Birken in einem Fichtenbestand bei angestrebten 25 % Mindest-Birkenstreuanteil (Berechnung in Anlage 16)....	152

## **10. Tabellenverzeichnis**

Tab. 1: Gesamtgehalte des Ausgangsgesteins (Rotgneis) der Bodenbildung von der Untersuchungsfläche ([Gewichts-%] bzw. für geringere Gehalte [mg/kg]) .....	13
Tab. 2: Tiefen- und Mächtigkeitsangaben [cm] der Bodenhorizonte von den Bodenprofilen auf der Untersuchungsfläche.....	14
Tab. 3: Jährliche Raten des Stoffeintrages in Kilogramm pro Hektar mit der modellierten Gesamtdeposition für die forstliche Dauerbeobachtungsfläche Olbernhau in den Jahren 1999 bis 2008, Quelle: SMUL (2009).....	15
Tab. 4: Kalkungen auf der Untersuchungsfläche .....	16
Tab. 5: Bodenphysikalische und -chemische Beschreibung des Bodenprofils c (die Angabe der Gesamtgehalte bzw. für den Humus z. T. KW-extrahierbaren Gehalte erfolgt in Masse-% bzw. für geringere Gehalte in mg/kg), n. A. ... nicht analysiert .....	17
Tab. 6: Einteilung der Signifikanzwerte .....	22
Tab. 7: Beschreibung der Fichten-Birken-Fläche.....	26
Tab. 8: Beschreibung der Fichten-Fläche .....	27
Tab. 9: Ermittelte Größen zur Charakterisierung des Strahlungsangebotes (vgl. Darstellung bei WAGNER 1995) .....	28
Tab. 10: Mengenangaben in den vegetationskundlichen Aufnahmen .....	34
Tab. 11: Tabelle zur Bestimmung der Stetigkeit von Sippen .....	34
Tab. 12: Bezeichnung der Transekte, sowie deren Länge und Probepunkteanzahl .....	35
Tab. 13: Probepunkteanzahl der Bodenvegetationsansprache in den drei Straten .....	35
Tab. 14: Termine des Aufbaus und der Leerung der Streufänge .....	36
Tab. 15: Auflistung der fünf Litter-Bag-Varianten (diese Tabelle dient gleichzeitig als Legende für 46	
Tab. 16: Ermittelte Trockensubstanzfaktoren .....	46
Tab. 17: Straten der Humuskörperansprache.....	49
Tab. 18: Übersicht über die verwendeten chemischen Methoden für die Boden- und Streuproben	50
Tab. 19: Stetigkeit für das Fichten-Birken-Transekt und das Fichten-Transekt nach Tab. 11 .....	65
Tab. 20: Kennwerte zur Verteilung der Sippenanzahl nach Straten für die Kraut- (KS) und Moosschicht (MS).....	67
Tab. 21: Daten für das PCA-Ordinationsdiagramm für die Krautschicht der drei Straten .....	69
Tab. 22: Kennzeichen der drei ermittelten Gruppen des PCA-Ordinationsdiagrammes (Abb. 34a)	70
Tab. 23: Kennwerte der Verteilung der mittleren Lichtzahl (mL), Feuchtezahl (mF) und Reaktionszahl (mR) der Moosschicht (MS) nach Straten .....	76
Tab. 24: Kennwerte des Deckungsgrades nach Straten getrennt nach Kraut- (KS) und Moosschicht (MS).....	79
Tab. 25: Vergleich beider Bestandessituationen hinsichtlich des Auftretens einzelner Sippen .....	82

Tab. 26: Lognormal-Modell mit Anisotropie (Richtungseffekt: verallg. Mises-Modell) der Trockenmasse der Birkenblätter für den Bereich Birke in Fichte für die Baumart Birke (Modellierung mit Birken im Umkreis von 35 m) .....	86
Tab. 27: Korrelation für das Lognormal-Modell mit Anisotropie (Richtungseffekt: verallg. Mises-Modell) der Trockenmasse der Birkenblätter für den Bereich Birke in Fichte.....	86
Tab. 28: Lognormal-Modell mit Anisotropie (Richtungseffekt: verallg. Mises-Modell) der Trockenmasse der Birkenblätter für den Bereich Birke in Fichte für die Baumart Birke.....	87
Tab. 29: Korrelation für das Lognormal-Modell mit Anisotropie (Richtungseffekt: verallg. Mises-Modell) der Trockenmasse der Birkenblätter für den Bereich Birke in Fichte.....	87
Tab. 30: Statistische Kennwerte für die Mächtigkeiten in den drei Straten .....	102
Tab. 31: Darstellung signifikanter Befunde aus dem Vergleich der Straten für einzelne erhobene Parameter im Oberboden nach Horizonten; nicht signifikante Befunde sind mit n. s. gekennzeichnet.....	118
Tab. 32: Datentabelle für das PCA-Ordinationsdiagramm für die absoluten Elementgehalte aus dem Königswasseraufschluss, die pH-Messung (KCI) sowie die Gehalte aus den C- und N-Analysen für den Of-Horizont der drei Straten .....	119
Tab. 33: Datentabelle für PCA-Ordinationsdiagramm für die absoluten Elementgehalte aus den Königswasseranalysen, die pH-Wert-Analysen in KCI sowie für die Gehalte aus den N-Analysen der drei Straten.....	120

## **11. Formelverzeichnis**

Formel 1: Bestandeshöhenkurvenfunktion (Gültigkeitsbereich: $14 \leq d \leq 50$ cm) .....	29
Formel 2: Gleichung zur Berechnung des Kronenradius .....	29
Formel 3: Gleichung zur Berechnung des Kronenansatzes .....	30
Formel 4: Gleichung zur Berechnung von PARWETTER.....	30
Formel 5: Berechnung der gesamten photosynthetisch aktiven Strahlung bei wolkenfreiem Himmel .....	31
Formel 6: Berechnung des Bewölkungsanteils.....	31
Formel 7: Verknüpfung über Kreisumfang .....	40
Formel 8: Lognormal-Dichtefunktion .....	40
Formel 9: mittlere Distanz .....	40
Formel 10: Punktwahrscheinlichkeit.....	40
Formel 11: Berücksichtigung der Baumgröße durch den Brusthöhendurchmesser .....	41
Formel 12: Lognormal-Funktion mit individuellem Baumeinfluss.....	41
Formel 13: Mises-Verteilung .....	41
Formel 14: Log-Normal-Modell mit integrierter Mises-Funktion .....	42



---

Formel 15: Berechnung der mittleren Ausbreitungsdistanz für den isotropen Fall .....	42
Formel 16: Berechnung der mittleren Ausbreitungsdistanz für den anisotropen Fall .....	43
Formel 17: Likelihood-Funktion für den diskreten Fall (BEICHELT und MONTGOMERY 2003) ....	44
Formel 18: Gleichung zur Berechnung des AIC`s.....	44
Formel 19: Gleichung zur Berechnung des BIC`s.....	44
Formel 20: Formel zur Berechnung des Trockensubstanzfaktors .....	46

## 12. Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

<u>Abkürzung/Symbol</u>	<u>Bedeutung</u>
Abb.	Abb. (-en)
AIC	Akaike's Information Criterion
BHD	Brusthöhendurchmesser [cm]
Bi	siehe GBI
BIC	Bayesian Information Criterion [BIC] oder Schwarz-Bayes Criterion [SBC]
BWI II	Bundeswaldinventur 2
CaCl <sub>2</sub>	Calciumchlorid
C <sub>ges</sub>	gesamter Kohlenstoff
C <sub>mik</sub>	mikrobieller Kohlenstoff
D°	Deckungsgrad
DIFFSF	Diffuse Site Factor
Fi	siehe GFI
GBI	Gemeine Birke ( <i>Betula pendula</i> Roth)
GFI	Gemeine Fichte ( <i>Picea abies</i> [L.] KARST.)
GLOB	Globale Gesamtstrahlung
GLOBDIFW	gesamte GLOB bei homogen bewölktem Himmel
GLOBDIFS	diffuse GLOB bei wolkenfreiem Himmel
GLOBDIRS	direkte GLOB bei wolkenfreiem Himmel
GLOBGESS	gesamte GLOB bei wolkenfreiem Himmel
h	Baumhöhe [m]
H100	Grundflächenmittelhöhe der 100 stärksten Bäume je ha (Spitzenhöhe)
H <sub>2</sub> O	Wasser
ha	Hektar
H/D-Verhältnis	Höhen/Durchmesser-Verhältnis
Kap.	Kapitel
KCl	Kaliumchlorid
KS	Krautschicht
KW	Königswasser
MDD	Mean Dispersal Distance
MS	Moosschicht
N <sub>ges</sub>	gesamter Stickstoff
N <sub>mik</sub>	mikrobieller Stickstoff
NN	Normal-Null
Nr.	Nummer
PACL	Percentage of light Above Canopy Level = durch das Modell „tRAYci“ gelieferter Wert für den relativen Lichtgenuss im Vergleich zur Freilandhelligkeit
PAR	photosynthetisch aktive Strahlung im Spektralbereich zwischen 400 und 700 (-750) nm

## 12. Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

---

PARDIFS	diffuse PAR bei wolkenfreiem Himmel
PARDIFW bzw. $PAR_{\text{bewölkt}}$	gesamte PAR bei homogen bewölkttem Himmel
PARDIRS	direkte PAR bei wolkenfreiem Himmel
PARGESS bzw. $PAR_{\text{wolkenfrei}}$	gesamte PAR bei wolkenfreiem Himmel = PARDIFS + PARDIRS
PARSF bzw. par %	PAR Site Factor = in Relation zu einer Freifläche angegebene PAR-Strahlung, die auch als „relativer Lichtgenuss“ bezeichnet wird
$PAR_{\text{Wetter}}$ bzw. $PAR_{\text{real}}$	$= PAR_{\text{bewölkt}} * (\text{Wolkenanteil}) + PAR_{\text{wolkenfrei}} * (1 - \text{Wolkenanteil})$
$qCO_2$	metabolischer Quotient (produziertes Kohlendioxid pro g mikrobiellen Kohlenstoffs) [ $mg\ CO_2/d * g^{-1}\ C_{\text{mik}}$ ]
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
SMUL	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
spec.	Angabe bei Unsicherheit der Artzugehörigkeit, wenn die Gattung bekannt ist
spp.	Subspezies
Tab.	Tab. (-en)
TRD	Trockenraumdichte
TS	Trockensubstanz
u. a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
$\chi^2$	Chiquadrat

## **13. Anlagenverzeichnis**

Anlage 1: Schadstufenverteilung für Fichte [%] für den gesamten Freistaat Sachsen (SMUL 2009).....	190
Anlage 2: Lufttemperatur (Monatsmittel) für die Jahre 2002 bis 2008 [°C].....	190
Anlage 3: Niederschlag (Monatssumme) für die Jahre 2002 bis 2008 [mm] .....	190
Anlage 4: Tabelle zur Einordnung des Grundgesteins von der Untersuchungsfläche .....	191
Anlage 5: Codierung der Litter-Bag-Varianten .....	192
Anlage 6: Codierung der einzelnen Litter-Bags .....	192
Anlage 7: Verwendete Eingangsgrößen für tRAYci zur Berechnung der Strahlungskarten des Fichten-Birkenbestandes.....	193
Anlage 8: Verwendete Eingangsgrößen für tRAYci zur Berechnung der Strahlungskarten des Fichtenbestandes .....	194
Anlage 9: Ergebnisse der Strahlungsmessung des Fichten-Birken- und Fichtenbestandes .....	195
Anlage 10: Abkürzungen der Sippenamen in der PCA .....	195
Anlage 11: Erläuterungen zu den Zeigerwerten nach ELLENBERG et al. (1992).....	196
Anlage 12: Erläuterungen zu den soziologisch-ökologischen Artengruppen nach PASSARGE und HOFMANN (1964) .....	197
Anlage 13: Erläuterungen zu den Waldgefäßpflanzen (WG-Pflanzen) nach SCHMIDT et al. (2003).....	198
Anlage 14: Zuordnung der Zeigerwerte, der soziologisch-ökologischen Artengruppen nach PASSARGE und HOFMANN (1964) sowie der Waldgefäßpflanzen (WG-Pflanzen) nach SCHMIDT et al. (2003) zu den einzelnen Sippen.....	199
Anlage 15: Stetigkeiten der Sippen der Krautschicht in den drei Straten .....	200
Anlage 16: Berechnung der Baumanzahl pro Hektar .....	200

## 14. Anlagen

Anlage 1: Schadstufenverteilung für Fichte [%] für den gesamten Freistaat Sachsen (SMUL 2009)

Alter [Jahre]	Schadstufe 0 ohne Schad- merkmale	Schadstufe 1 schwach geschädigt	Schadstufe 2 mittelstark geschädigt	Schadstufe 3 und 4 stark geschä- digt/abgestorben	Schadstufe 2 – 4 deutlich geschädigt
bis 60	75	19	5	1	6
über 60	24	46	28	2	30
gesamt	45	35	19	1	20

Anlage 2: Lufttemperatur (Monatsmittel) für die Jahre 2002 bis 2008 [°C]

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Mittelwert aller Jahre
<b>Januar</b>	-2,3	-4,7	-4,9	-1,8	-6,7	1,1	-0,5	-2,8
<b>Februar</b>	1,0	-6,3	-1,3	-5,6	-4,6	0,4	0,8	-2,2
<b>März</b>	1,2	1,2	0,3	-0,9	-2,7	2,9	0,4	0,3
<b>April</b>	4,1	4,2	6,1	6,2	4,2	8,4	4,4	5,3
<b>Mai</b>	11,2	11,8	7,9	9,9	9,4	11,8	11,2	10,5
<b>Juni</b>	13,7	16,1	12,1	12,5	13,2	14,8	14,1	13,8
<b>Juli</b>	14,5	15,2	13,7	14,6	18,7	15,2	14,8	15,2
<b>August</b>	15,4	17,0	14,9	12,2	12,2	13,0	14,0	14,1
<b>September</b>	8,9	11,1	10,2	11,3	13,6	9,0	8,9	10,4
<b>Oktober</b>	4,1	2,4	6,8	7,1	8,7	5,2	5,9	5,8
<b>November</b>	1,3	3,3	0,7	-0,3	3,9	-0,6	2,3	1,5
<b>Dezember</b>	-4,9	-1,4	-2,1	-3,5	1,5	-1,7	-2,1	-2,0
<b>Mittelwert für das Jahr</b>	5,7	5,8	5,4	5,1	5,9	6,6	6,2	5,8

Anlage 3: Niederschlag (Monatssumme) für die Jahre 2002 bis 2008 [mm]

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Mittelwert aller Jahre
<b>Januar</b>	23,1	102,7	143,3	145,7	37,2	142,6	91,9	98,1
<b>Februar</b>	127,9	28,2	78,6	143,5	6,5	67,4	28,3	68,6
<b>März</b>	57,0	31,7	57,3	82,3	155,6	58,9	112,7	79,4
<b>April</b>	44,5	55,6	24,5	30,6	59,9	0,7	120,4	48,0
<b>Mai</b>	80,8	53,8	150,4	107,0	82,5	163,1	36,7	96,3
<b>Juni</b>	78,8	66,4	75,5	85,0	64,2	128,3	64,8	80,4
<b>Juli</b>	94,6	115,9	134,0	141,9	28,5	118,0	75,0	101,1
<b>August</b>	294,3	26,5	66,2	95,8	128,1	28,8	87,8	103,9
<b>September</b>	74,9	36,1	74,1	80,8	21,4	148,5	68,6	72,1
<b>Oktober</b>	94,3	67,4	46,0	27,6	83,5	30,6	95,6	63,6
<b>November</b>	157,0	24,9	178,5	41,1	39,5	176,8	68,2	98,0
<b>Dezember</b>	79,5	66,9	65,9	72,1	46,8	56,5	81,6	67,0
<b>Summe für das Jahr</b>	1206,7	676,1	1094,3	1053,4	753,7	1120,2	931,6	976,6

Anlage 4: Tabelle zur Einordnung des Grundgesteins von der Untersuchungsfläche

Gehalte	Untere	Obere	Paragneis	Rotgneise	Untersuchungsfläche
	Graugneise	Graugneise	(Landesamt)		Olbernhau
[%]	<sup>1</sup>	<sup>1</sup>	<sup>2</sup>	<sup>1</sup>	
SiO <sub>2</sub>	68,7	68,8		73,8	
TiO <sub>2</sub>	0,7	0,6		0,2	0,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,9	14,2	15,5	13,4	12,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,1	4,7	5,2	2,0	1,9
MgO	1,5	1,7	2,0	0,5	0,3
CaO	1,2	1,4	1,7	0,6	0,4
Na <sub>2</sub> O	3,0	2,8	3,0	3,0	2,3
K <sub>2</sub> O	4,1	3,3	3,7	4,6	4,8
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

<sup>1</sup> Vergleich der Gneise zur Habilitationsschrift von TICHOMIROWA (2003)

<sup>2</sup> Daten vom Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (G. RANK)

- ⇒ geringere Al, Ti, Fe, Mg, Ca-Gehalte als bei den Grau- bzw. Paragneisen, aber höhere K-Gehalte als bei Grau- bzw. Paragneisen
- ⇒ der Gneis Untersuchungsfläche ist demzufolge den Rot- bzw. Orthogneisen zuzuordnen

## 14. Anlagen

Anlage 5: Codierung der Litter-Bag-Varianten

Variante	Ausbringungsorte	Wiederholung	Entnahmetermin
I	A	1	W
II	B	2	X
III	C	3	Y
IV		4	Z
V		5	

Anlage 6: Codierung der einzelnen Litter-Bags

unter der Birkenkrone												
Block 1					Block 2					Block 3		
1A1W	1A1X	1A1Y	1A1Z		1A2W	1A2X	1A2Y	1A2Z		1A3W	1A3X	1A3Y
2A1W	2A1X	2A1Y	2A1Z		2A2W	2A2X	2A2Y	2A2Z		2A3W	2A3X	2A3Y
3A1W	3A1X	3A1Y	3A1Z		3A2W	3A2X	3A2Y	3A2Z		3A3W	3A3X	3A3Y
4A1W	4A1X	4A1Y	4A1Z		4A2W	4A2X	4A2Y	4A2Z		4A3W	4A3X	4A3Y
5A1W	5A1X	5A1Y	5A1Z		5A2W	5A2X	5A2Y	5A2Z		5A3W	5A3X	5A3Y
Block 4					Block 5							
1A4W	1A4X	1A4Y	1A4Z		1A5W	1A5X	1A5Y	1A5Z				
2A4W	2A4X	2A4Y	2A4Z		2A5W	2A5X	2A5Y	2A5Z				
3A4W	3A4X	3A4Y	3A4Z		3A5W	3A5X	3A5Y	3A5Z				
4A4W	4A4X	4A4Y	4A4Z		4A5W	4A5X	4A5Y	4A5Z				
5A4W	5A4X	5A4Y	5A4Z		5A5W	5A5X	5A5Y	5A5Z				

Übergangsbereich												
Block 1					Block 2					Block 3		
1B1W	1B1X	1B1Y	1B1Z		1B2W	1B2X	1B2Y	1B2Z		1B3W	1B3X	1B3Y
2B1W	2B1X	2B1Y	2B1Z		2B2W	2B2X	2B2Y	2B2Z		2B3W	2B3X	2B3Y
3B1W	3B1X	3B1Y	3B1Z		3B2W	3B2X	3B2Y	3B2Z		3B3W	3B3X	3B3Y
4B1W	4B1X	4B1Y	4B1Z		4B2W	4B2X	4B2Y	4B2Z		4B3W	4B3X	4B3Y
5B1W	5B1X	5B1Y	5B1Z		5B2W	5B2X	5B2Y	5B2Z		5B3W	5B3X	5B3Y
Block 4					Block 5							
1B4W	1B4X	1B4Y	1B4Z		1B5W	1B5X	1B5Y	1B5Z				
2B4W	2B4X	2B4Y	2B4Z		2B5W	2B5X	2B5Y	2B5Z				
3B4W	3B4X	3B4Y	3B4Z		3B5W	3B5X	3B5Y	3B5Z				
4B4W	4B4X	4B4Y	4B4Z		4B5W	4B5X	4B5Y	4B5Z				
5B4W	5B4X	5B4Y	5B4Z		5B5W	5B5X	5B5Y	5B5Z				

unter Fichte ohne Einmischung von Birke												
Block 1					Block 2					Block 3		
1C1W	1C1X	1C1Y	1C1Z		1C2W	1C2X	1C2Y	1C2Z		1C3W	1C3X	1C3Y
2C1W	2C1X	2C1Y	2C1Z		2C2W	2C2X	2C2Y	2C2Z		2C3W	2C3X	2C3Y
3C1W	3C1X	3C1Y	3C1Z		3C2W	3C2X	3C2Y	3C2Z		3C3W	3C3X	3C3Y
4C1W	4C1X	4C1Y	4C1Z		4C2W	4C2X	4C2Y	4C2Z		4C3W	4C3X	4C3Y
5C1W	5C1X	5C1Y	5C1Z		5C2W	5C2X	5C2Y	5C2Z		5C3W	5C3X	5C3Y
Block 4					Block 5							
1C4W	1C4X	1C4Y	1C4Z		1C5W	1C5X	1C5Y	1C5Z				
2C4W	2C4X	2C4Y	2C4Z		2C5W	2C5X	2C5Y	2C5Z				
3C4W	3C4X	3C4Y	3C4Z		3C5W	3C5X	3C5Y	3C5Z				
4C4W	4C4X	4C4Y	4C4Z		4C5W	4C5X	4C5Y	4C5Z				
5C4W	5C4X	5C4Y	5C4Z		5C5W	5C5X	5C5Y	5C5Z				

### Anlage 7: Verwendete Eingangsgrößen für tRAYci zur Berechnung der Strahlungskarten des Fichten-Birkenbestandes

[* tRAYci Settings *]		
[*** Files ***]		
Parameter_input_file	tRAYciPTS.par	
Tree_list_input_file	tRAYciPTS.tls	
[*** Parameters ***]		
[- Plot parameters -]		
PlotX_(m)	46	
PlotY_(m)	77	
Orientation_(deg)	328	
Slope_(%)	0	
SlopeDirection_(deg)	0	
[- Tree list parameters -]		
NoCrownRadii_(1/4...8)	8	
NoSpecies	2	
SpeciesNames	fichte	birke
[- Crown parameters -]		
Eup	2	9
Elow	1	2
HeightMaxWidth_(%CL)	0.2	0.8
ShellThickUp_(%CL)	35	25
ShellThickLow_(%CL)	65	10
LAD_(m2/m3)	2	1
[- Light parameters -]		
Latitude_(deg)	50.4	
FirstDay_(J.no)	121	
LastDay_(J.no)	243	
PctDiffuse_(%)	70	
b	1.23	
[*** Options ***]		
[- General -]		
CrownCalcWrap_(0/1/2/3)	1	
LightCalcWrap_(0/1/2/3)	1	
GridCellWidth_(m)	0.2	
RayResolution_(1/3/5/9/15)	1	
CosineCorrection_(0/1)	1	
[- Tree light only -]		
PointsPerTree	100	
SelfShading_(0/1/2)	0	
UpperCrown_(%)	100	
Absorption_(0/1/2)	1	



### Anlage 8: Verwendete Eingangsgrößen für tRAYci zur Berechnung der Strahlungskarten des Fichtenbestandes

```

[* tRAYci Settings *]
[*** Files ***]
Parameter_input_file      E:\tRAYciPTS.par
Tree_list_input_file      tRAYciPTS.tls
[*** Parameters ***]
[- Plot parameters -]
PlotX_(m)                 52
PlotY_(m)                 70
Orientation_(deg)         310
Slope_(%)                 0
SlopeDirection_(deg)      0
[- Tree list parameters -]
NoCrownRadii_(1/4...8)    8
NoSpecies                 2
SpeciesNames              fichte      birke
[- Crown parameters -]
Eup                       2.1          1.5
Elow                      1            1
HeightMaxWidth_(%CL)     0.1          0.4
ShellThickUp_(%CL)       70           25
ShellThickLow_(%CL)      15           10
LAD_(m2/m3)              4            1.5
[- Light parameters -]
Latitude_(deg)            50.4
FirstDay_(J.no)           121
LastDay_(J.no)            243
PctDiffuse_(%)            70
b                         1.23
[*** Options ***]
[- General -]
CrownCalcWrap_(0/1/2/3)  1
LightCalcWrap_(0/1/2/3)  1
GridCellWidth_(m)        0.2
RayResolution_(1/3/5/9/15) 1
CosineCorrection_(0/1)    1
[- Tree light only -]
PointsPerTree             100
SelfShading_(0/1/2)       0
UpperCrown_(%)            100
Absorption_(0/1/2)        1

```

## 14. Anlagen

Anlage 9: Ergebnisse der Strahlungsmessung des Fichten-Birken- und Fichtenbestandes

Punkt	Bestand	DIFFSF [%]	GLOBDIFS Watt/m²	GLOBDIRS Watt/m²	GLOBGESS Watt/m²	GLOBDFW Watt/m²	PARDIRS Watt/m²	PARDIFS Watt/m²	PARGESS Watt/m²	PARDIFW Watt/m²	Wetter Watt/m²	PAR% [%]
1	Fi-Bi	0,1	4,9	23,7	28,6	5,6	9,5	3,2	12,7	3,6	6,3	6,1
2	Fi-Bi	0,0	2,5	22,6	25,1	2,8	9,0	1,6	10,6	1,8	4,5	4,3
3	Fi-Bi	0,0	3,6	4,3	8,0	4,1	1,7	2,4	4,0	2,7	3,1	2,9
4	Fi-Bi	0,1	6,7	1,5	8,2	7,6	0,6	4,4	4,9	4,9	4,9	4,7
5	Fi-Bi	0,0	3,5	5,6	9,0	3,9	2,2	2,2	4,4	2,5	3,1	3,0
6	Fi-Bi	0,0	2,9	5,7	8,6	3,2	2,3	1,9	4,1	2,1	2,7	2,6
7	Fi-Bi	0,0	3,8	5,1	9,0	4,3	2,0	2,5	4,5	2,8	3,3	3,2
8	Fi-Bi	0,1	5,7	12,7	18,3	6,4	5,0	3,7	8,7	4,1	5,5	5,3
9	Fi-Bi	0,1	4,0	20,8	24,8	4,5	8,3	2,6	10,9	2,9	5,3	5,1
10	Fi-Bi	0,1	5,8	33,5	39,3	6,6	13,4	3,8	17,2	4,3	8,1	7,8
11	Fi-Bi	0,0	3,5	8,3	11,8	4,0	3,3	2,3	5,6	2,6	3,5	3,3
12	Fi-Bi	0,1	5,0	11,2	16,2	5,7	4,4	3,3	7,7	3,7	4,9	4,7
13	Fi-Bi	0,1	7,4	8,6	16,0	8,4	3,4	4,8	8,3	5,5	6,3	6,0
14	Fi-Bi	0,0	3,1	5,9	8,9	3,5	2,3	2,0	4,3	2,3	2,9	2,8
15	Fi-Bi	0,1	5,6	10,6	16,2	6,3	4,2	3,6	7,8	4,1	5,2	5,0
16	Fi-Bi	0,1	4,3	7,1	11,4	4,8	2,8	2,8	5,6	3,1	3,9	3,7
17	Fi-Bi	0,0	3,9	35,2	39,1	4,4	14,0	2,5	16,6	2,9	7,0	6,7
18	Fi-Bi	0,0	2,5	14,6	17,1	2,8	5,8	1,6	7,4	1,9	3,5	3,4
19	Fi-Bi	0,0	1,8	12,0	13,7	2,0	4,8	1,1	5,9	1,3	2,7	2,6
20	Fi-Bi	0,1	4,3	3,8	8,1	4,8	1,5	2,8	4,3	3,1	3,5	3,3
21	Fi	0,1	5,4	22,3	27,7	6,1	8,8	3,5	12,4	4,0	6,5	6,2
22	Fi	0,1	4,5	26,8	31,3	5,1	10,6	2,9	13,5	3,3	6,4	6,1
23	Fi	0,1	5,2	9,1	14,3	5,8	3,6	3,4	7,0	3,8	4,7	4,5
24	Fi	0,1	4,6	13,9	18,5	5,1	5,6	3,0	8,5	3,3	4,9	4,7
25	Fi	0,0	3,3	6,2	9,4	3,7	2,4	2,1	4,6	2,4	3,1	2,9
26	Fi	0,0	2,9	0,6	3,5	3,3	0,2	1,9	2,1	2,1	2,1	2,1
27	Fi	0,0	2,0	16,8	18,8	2,3	6,7	1,3	8,0	1,5	3,4	3,3
28	Fi	0,0	1,1	1,8	2,9	1,3	0,7	0,7	1,4	0,8	1,0	1,0
29	Fi	0,0	3,3	3,7	7,0	3,7	1,5	2,1	3,6	2,4	2,8	2,7
30	Fi	0,0	2,2	4,0	6,2	2,5	1,6	1,4	3,0	1,6	2,0	2,0
31	Fi	0,0	3,3	5,1	8,4	3,8	2,0	2,2	4,1	2,5	3,0	2,8
32	Fi	0,0	2,8	8,6	11,4	3,2	3,3	1,9	5,2	2,1	3,0	2,9
33	Fi	0,1	4,9	8,5	13,3	5,5	3,3	3,2	6,4	3,6	4,4	4,2
34	Fi	0,1	6,2	15,9	22,1	7,0	6,3	4,0	10,3	4,6	6,3	6,0
35	Fi	0,0	2,2	2,2	4,5	2,5	0,9	1,5	2,3	1,6	1,8	1,8
36	Fi	0,1	4,9	20,5	25,4	5,6	8,1	3,2	11,3	3,6	5,9	5,7
37	Fi	0,1	6,0	20,2	26,2	6,8	8,1	3,9	12,0	4,4	6,7	6,4
38	Fi	0,0	3,7	27,0	30,7	4,2	10,8	2,4	13,2	2,7	5,9	5,6
39	Fi	0,0	2,1	5,8	7,9	2,4	2,3	1,4	3,6	1,5	2,2	2,1
40	Fi	0,1	5,2	12,6	17,8	5,9	5,0	3,4	8,4	3,8	5,2	5,0
Leerbild							158,1	52,2	210,3	58,9	104,3	100,0

Anlage 10: Abkürzungen der Sippennamen in der PCA

Sippe	Abkürzung
<i>Calamagrostis villosa</i>	CalaVil
<i>Cardamine flexuosa</i>	CardFlex
<i>Deschampsia flexuosa</i>	DesFlex
<i>Digitalis purpurea</i>	DigPur
<i>Dryopteris carthusiana</i>	DryCart
<i>Dryopteris dilatata</i>	DryDila
<i>Epilobium montanum</i>	EpilMont
<i>Galium saxatile</i>	GalSax
<i>Moehringia trinervia</i>	MoehTri
<i>Mycelis muralis</i>	MycMur
<i>Oxalis acetosella</i>	OxaAce
<i>Picea abies</i>	PicAb
<i>Senecio ovatus</i>	SeneOv
<i>Stellaria media</i>	StelMed
<i>Taraxacum officinale</i> sect. <i>Ruderalia</i>	TaraOff
<i>Urtica dioica</i> ssp. <i>dioica</i>	UrtDio
<i>Vaccinium myrtillus</i>	VaccMyrt
<i>Veronica officinalis</i>	VerOff

### Anlage 11: Erläuterungen zu den Zeigerwerten nach ELLENBERG et al. (1992)

#### **L = Lichtzahl**

(Vorkommen in Beziehung zur relativen Beleuchtungsstärke = r. B.). Maßgebend ist für alle Arten die r. B., die an ihrem Wuchsort zur Zeit der vollen Belaubung der sommergrünen Pflanzen bei diffuser Beleuchtung herrscht.

- 1 Tiefschattenpflanzen, noch bei weniger als 1 %, selten bei mehr als 30 % r. B. vorkommend
- 2 zwischen 1 und 3 stehend
- 3 Schattenpflanzen, meist bei weniger als 5 % r. B., doch auch an helleren Stellen
- 4 zwischen 3 und 5 stehend
- 5 Halbschattenpflanzen, nur ausnahmsweise im vollen Licht, meist aber bei mehr als 10 % r. B.
- 6 zwischen 5 und 7 stehend
- 7 Halblichtpflanzen, meist bei vollem Licht, aber auch im Schatten bis etwa 30 % r. B.
- 8 Lichtpflanzen, nur ausnahmsweise bei weniger als 40 % r. B.
- 9 Volllichtpflanzen, nur an voll bestrahlten Plätzen, nicht bei weniger als 50 % r. B.

#### **F = Feuchtezahl**

(Vorkommen im Gefälle der Bodenfeuchtigkeit vom flachgründig-trockenen Felshang bis zu sumpfigen Bedingungen.)

- 1 Starktrockniszeiger, an oftmals austrocknenden Stellen lebensfähig und auf trockene Böden beschränkt
- 2 zwischen 1 und 3 stehend
- 3 Trockniszeiger, auf trockenen Böden häufiger vorkommend als auf frischen; auf feuchten Böden fehlend
- 4 zwischen 3 und 5 stehend
- 5 Frischezeiger, Schwergewicht auf mittelfeuchten Böden, auf nassen sowie auf öfter austrocknenden Böden fehlend
- 6 zwischen 5 und 7 stehend
- 7 Feuchtezeiger, Schwergewicht auf gut durchfeuchteten, aber nicht nassen Böden
- 8 zwischen 7 und 9 stehend
- 9 Nässezeiger, Schwergewicht auf oft durchnäßten (luftarmen) Böden

#### **R = Reaktionszahl**

(Vorkommen im Gefälle der Bodenreaktion und des Kalkgehaltes.)

- 1 Starksäurezeiger, niemals auf schwachsauren bis alkalischen Böden vorkommend
- 2 zwischen 1 und 3 stehend
- 3 Säurezeiger, Schwergewicht auf sauren Böden, ausnahmsweise bis in den neutralen Bereich
- 4 zwischen 3 und 5 stehend
- 5 Mäßigsäurezeiger, auf stark sauren wie auf neutralen bis alkalischen Böden selten
- 6 zwischen 5 und 7 stehend
- 7 Schwachsäure- bis Schwachbasenzeiger, niemals auf stark sauren Böden
- 8 zwischen 7 und 9 stehend, d.h. meist auf Kalkweisend
- 9 Basen- und Kalkzeiger, stets auf kalkreichen Böden

#### **N = Stickstoffzahl, Nährstoffzahl**

(Vorkommen im Gefälle der Mineralstickstoffversorgung während der Vegetationszeit.)

- 1 Stickstoffärmste Standorte anzeigend
- 2 zwischen 1 und 3 stehend
- 3 auf stickstoffarmen Standorten häufiger als auf mittelmäßigen und nur ausnahmsweise auf reichen
- 4 zwischen 3 und 5 stehend
- 5 mäßig stickstoffreiche Standorte anzeigend, auf armen und reichen seltener
- 6 zwischen 5 und 7 stehend
- 7 an stickstoffreichen Standorten häufiger als auf mittelmäßigen und nur ausnahmsweise auf ärmeren
- 8 ausgesprochener Stickstoffzeiger
- 9 an übermäßig stickstoffreichen Standorten konzentriert

### Anlage 12: Erläuterungen zu den soziologisch-ökologischen Artengruppen nach PASSARGE und HOFMANN (1964)

#### 2.2.b *Humulus*-Gruppe

Erlen-Eschenwaldsäume und –Schläge, Erlen-Eschenwälder; feucht, reich bis kräftig-nitrophil.

#### 3.4.a *Dryopteris*-Gruppe

Anspruchsvollere Waldgesellschaften, besonders im Bereich der baltischen und montanen Buchen- und Fichtengebiete; feucht bis mäßig frisch, reich bis mittel, kühl.

#### 5.2. *Milium*-Gruppe

Laubwälder, Gebüsche, Säume und Schläge; feucht bis mäßig frisch, reich bis mittel.

#### 5.3.a *Rubus*-Gruppe

Waldschläge, Saum- und Gebüschgesellschaften, Nadelholzforsten, gestörte Laubwälder; feucht bis mäßig trocken, reich bis mittel, lichtliebend.

#### 5.4. *Asperula*(*Galium*)-Gruppe

Anspruchsvollere Laubwälder und deren Gebüsch- und Saumgesellschaften, bevorzugt in Buchenwaldgebieten; frisch bis mäßig trocken, reich bis kräftig.

#### 5.5.b *Galeobdolon*-Gruppe

Anspruchsvollere Laubwälder und deren Gebüsch- und Saumgesellschaften; frisch bis mäßig trocken, reich bis kräftig.

#### 5.6.a/b *Poa nemoralis*-Gruppe

Laubwälder, Gebüsche, Säume und Schläge; frisch bis trocken, b) feucht bis trocken, reich bis mittel und z. T. lichtliebend.

#### 6.7.a/b *Melampyrum*-Gruppe

Anspruchslose Wälder, Forsten und Gebüsche, Saum- und Schlaggesellschaften sowie Heiden; feucht bis mäßig trocken, (mittel-) mäßig arm bis arm.

#### 7.2. *Agrostis tenuis* (*Hieracium laevigatum*)-Gruppe

Trockenwälder und anspruchslosere Laubwälder, deren Gebüsch-, Saum- und Schlaggesellschaften; mäßig frisch bis trocken, mittel bis mäßig arm, lichtliebend.

#### M3.1. *Mnium hornum*-Gruppe

Frisch bis mäßig frisch, mittel bis arm.

#### M4.1. *Plagiomnium undulatum*-Gruppe

Feucht bis mäßig frisch, reich.

#### M5.1. *Atrichum*-Gruppe

Frisch bis mäßig trocken, reich bis mittel.

#### M6.1. *Dicranella*-Gruppe

Frisch bis mäßig trocken, mittel bis arm.

#### M6.3. *Dicranum scoparium*-Gruppe

Frisch bis trocken, ziemlich arm bis arm.

Anlage 13: Erläuterungen zu den Waldgefäßpflanzen (WG-Pflanzen) nach SCHMIDT et al. (2003)

B = Sippen der Baumschicht

S = Sippen der Strauchschicht

S2.1 = im Wald und im Offenland, im Wald wie im Offenland

K = Sippen der Krautschicht

K1 = weitgehend an Wald gebunden

K1.1 = vorwiegend im geschlossenen Wald

K1.2 = vorwiegend an Waldrändern und Waldverlichtungen

K2 = im Wald und im Offenland

K2.1 = im Wald wie im Offenland

K2.2 = auch im Wald, aber Schwerpunkt im Offenland

## 14. Anlagen

Anlage 14: Zuordnung der Zeigerwerte, der soziologisch-ökologischen Artengruppen nach PASSARGE und HOFMANN (1964) sowie der Waldgefäßpflanzen (WG-Pflanzen) nach SCHMIDT et al. (2003) zu den einzelnen Sippen<sup>5</sup>

	Bemerkung	Zeigerwerte				Soz.-Ökol. AG	WG-Pflanzen
						Passarge & Hofmann (1964)	Schmidt et al. (2003)
<b>Krautschicht</b>		<b>L</b>	<b>F</b>	<b>R</b>	<b>N</b>		für das Hügel- und Bergland
<i>Calamagrostis villosa</i> (Chaix) J. F. Gmel. (Wolliges Reitgras)		6	7	2	2		K2.1
<i>Cardamine flexuosa</i> With. (Wald-Schaumkraut)		6	8	4	5	(5.5.b)	K1.2
<i>Carex pilulifera</i> L. (Pillen-Segge)		5	5	3	3	6.7.b	K2.1
<i>Deschampsia flexuosa</i> (L.) Trin. (Draht-Schmiehe)		6	x	2	3	6.7.b	K2.1
<i>Digitalis purpurea</i> L. (Roter Fingerhut)		7	5	3	6		K1.2
<i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H. P. Fuchs (Gewöhnlicher Dornfarn)		5	x	4	3	3.4.a	K2.1
<i>Dryopteris dilatata</i> (Hoffm.) A. Gray (Breitblättriger Dornfarn)		4	6	x	7	3.4.a, (5.3.a)	K2.1
<i>Epilobium angustifolium</i> L. (Wald-Weidenröschen)		8	5	5	8	(5.3.a), 6.1.	K2.1
<i>Epilobium montanum</i> L. (Berg-Weidenröschen)		4	5	6	6	5.4.	K2.1
<i>Fagus sylvatica</i> L. (Rotbuche)		3	5	x	x		V
<i>Galium saxatile</i> L. (Sand-Labkraut)		7	5	2	3		K2.1
<i>Moehringia trinervia</i> (L.) Clairv. (Dreinerige Nabelmiere)		4	5	6	7	5.6.b	K1.1
<i>Mycelis muralis</i> (L.) Dum. (Mauerlattich)		4	5	x	6	5.6.a	K2.1
<i>Oxalis acetosella</i> L. (Wald-Sauerklee)		1	5	4	6	(3.4.a im S), 5.2.	K1.1
<i>Picea abies</i> (L.) H. Karsten (Gemeine Fichte)		5	x	x	x		V
<i>Poa nemoralis</i> L. (Hain-Rispengras)		5	5	5	4		K2.1
<i>Rubus idaeus</i> L. (Himbeere)		7	x	x	6		S2.1
<i>Senecio ovatus</i> (G. M. Sch.) Willd. (Fuchssches Geiskraut)		7	5	x	8	5.4.	K1.2
<i>Sorbus aucuparia</i> L. (Vogelbeere)		6	x	4	x		V
<i>Stellaria media</i> (L.) Vill. (Gewöhnliche Vogelmiere)		6	x	7	8		K2.2
<i>Taraxacum officinale</i> sect. <i>Ruderalia</i> Kirschn. (Gewöhnlicher Löwenzahn)		7	5	x	8		K2.1
<i>Urtica dioica</i> L. (Große Brennnessel)		x	6	7	9	2.2.b	K2.1
<i>Vaccinium myrtillus</i> L. (Heidelbeere)		5	x	2	3	6.7.a	K2.1
<i>Veronica officinalis</i> L. (Wald-Ehrenpreis)		6	4	3	4	7.2.	K2.1
<b>Moosschicht</b>							
<i>Brachythecium rutabulum</i> (Hedw.) (Gemeines Kurzbüchsenmoos)		5	4	x		(M5.1.)	
<i>Brachythecium salebrosum</i> (Web. & Mohr) (Glattstielige Kurzbüchsenmoos)		6	4	6			
<i>Brachythecium velutinum</i> (Hedw.) Schimp. (Samt-Kurzbüchsenmoos)		5	4	6			
<i>Dicranella heteromalla</i> (Hedw.) Schimp. (Sicheliges Kleingabelzahnmoos)		5	4	2		M6.1.	
<i>Dicranum scoparium</i> Hedw. Besenmoos		5	4	4		M6.3.	
<i>Eurhynchium praelongum</i> (Hedw.) Schimp. (Langblättriges Schönschnabelmoos)		6	6	5		M4.1.	
<i>Hypnum cupressiforme</i> Hedw. (Zypressen-Schlafmoos)		5	4	4		M6.3.	
<i>Lophocolea bidentata</i> (L.) Dum. (Zweizähliges Kammkelchmoos)		7	6	5			
<i>Lophocolea heterophylla</i> (Schrad.) Dum. (Verschiedenblättriges Kammkelchmoos)		4	4	3			
<i>Mnium homum</i> Hedw. (Schwanenhals-Stemmoos)		5	6	3		M3.1.	
<i>Plagiothecium denticulatum</i> (Hedw.) Schimp. (Zahn-Plattmoos)		5	4	5		M6.1.	
<i>Plagiothecium curvifolium</i> Schlieph. Ex Limpr. (glänzendes Plattmoos)		5	4	2		M6.1.	
<i>Polytrichum formosum</i> Hedw. (Schönes Widertonmoos)		7	5	2		M6.2.	
<i>Sanionia uncinata</i> (Hedw.) Loeske (Hakenmoos)	Vorw arnliste der Roten Liste	x	7	3			
<i>Thuidium tamariscinum</i> (Hedw.) Schimp. (Tamarisken-Thujamoos)		4	7	4			

<sup>5</sup> Erläuterungen zu den Abkürzungen in der Anlage 13 befinden sich in den Anlagen 10 bis 12.

Anlage 15: Stetigkeiten der Sippen der Krautschicht in den drei Straten

Sippenname	KS/ MS	Birke	Fichte-Birke	Fichte
		Stetigkeit [%]		
<i>Calamagrostis villosa</i>	KS	96,9 (V)	95,5 (V)	33,9 (II)
<i>Cardamine flexuosa</i>	KS	84,4 (V)	32,8 (II)	35,7 (II)
<i>Carex pilulifera</i>	KS	0	1,5 (I)	0
<i>Deschampsia flexuosa</i>	KS	68,8 (IV)	40,3 (III)	16,1 (I)
<i>Digitalis purpurea</i>	KS	21,9 (II)	11,9 (I)	0
<i>Dryopteris carthusiana</i>	KS	0	3,0 (I)	5,4 (I)
<i>Dryopteris dilatata</i>	KS	15,6 (I)	28,4 (II)	0
<i>Epilobium angustifolium</i>	KS	0	0	1,8 (I)
<i>Epilobium montanum</i>	KS	43,8 (III)	13,4 (I)	10,7 (I)
<i>Fagus sylvatica</i>	KS	0	0	1,8 (I)
<i>Galium saxatile</i>	KS	0	9,0 (I)	5,4 (I)
<i>Moehringia trinervia</i>	KS	6,3 (I)	0	3,6 (I)
<i>Mycelis muralis</i>	KS	62,5 (IV)	53,7 (III)	71,4 (IV)
<i>Oxalis acetosella</i>	KS	28,1 (II)	25,4 (II)	44,6 (III)
<i>Picea abies</i>	KS	68,8 (IV)	59,7 (III)	98,2 (V)
<i>Poa nemoralis</i>	KS	0	4,5 (I)	0
<i>Rubus idaeus</i>	KS	0	3,0 (I)	0
<i>Senecio ovatus</i>	KS	81,3 (V)	68,7 (IV)	32,1 (II)
<i>Sorbus aucuparia</i>	KS	6,3 (I)	0	3,6 (I)
<i>Stellaria media</i>	KS	31,3 (II)	13,4 (I)	10,7 (I)
<i>Taraxacum officinale</i> sect. <i>Ruderalia</i>	KS	28,1 (II)	10,4 (I)	1,8 (I)
<i>Urtica dioica</i> ssp. <i>dioica</i>	KS	34,4 (II)	19,4 (I)	3,6 (I)
<i>Vaccinium myrtillus</i>	KS	46,9 (III)	68,7 (IV)	50,0 (III)
<i>Veronica officinalis</i>	KS	25,0 (II)	3,0 (I)	1,8 (I)

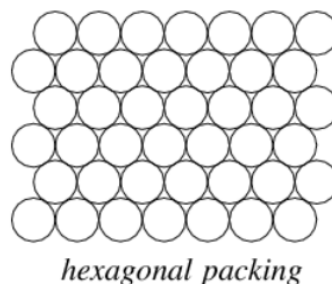
I= 0,1-20 %; II= 20,1-40 %; III= 40,1-60%; IV= 60,1-80%; V= 80,1-100%

Anlage 16: Berechnung der Baumanzahl pro Hektar

Um den Bestand vollständig mit so viel Birkenstreu zu bedecken, dass Effekte auf den Oberboden durch die Laubstreu erzielt werden können (in dieser Arbeit ist das bis zu einem Abstand von ca. 10 m vom Birkenstamm der Fall), muss die optimale Anzahl von einzelbaumweise eingemischten Birken auf einem Hektar ermittelt werden. Hierfür dient die folgende Berechnung:

### 1. Schritt:

Aus der Packungsoptimierung (z. B. SCHEITHAUER 2008) ist bekannt, dass die optimale Packung (dichteste Packung) mit Kugeln bei hexagonaler Packung (u. a. FUKSHANSKY 1991) gegeben ist. Hierbei ist der Zwischenraum zwischen den Kreisen am geringsten (Abb. 1 dieser Anlage).

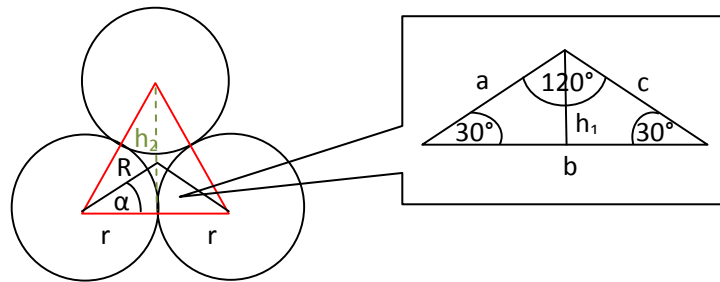


Anlage 16\_Abb. 1: Hexagonal lattice of the bee's honeycomb (Quelle: STEINHAUS 1999, p. 202)

Packungsfragen (z. B. bei Kugeln) betreffen ganze Körper, die sich nicht überschneiden können. Bei der Streuverteilung ist die Überschneidung der Kreise aber möglich und notwendig, um die ganze Fläche (ein Hektar) mit Streu zu bedecken. Um die Lücken zwischen den Kreisen zu ver-

meiden, müssen die Kreise also näher zusammengeschoben werden. Die Kreise sollen aber weiterhin der hexagonalen Anordnung folgen. Deshalb muss der Radius  $r_{\text{neu}}$  eines kleineren Kreises bestimmt werden (siehe 2. Schritt). Wird dieser dann wieder auf 10 m erweitert, existieren keine Streulücken im Bestand.

## 2. Schritt:



Anlage 16\_Abb. 2: Grundlagen der Berechnung

Betrachtet man Abb. 2 dieser Anlage, ist ein gleichseitiges Dreieck erkennbar, von dem die Länge von  $R$  (bzw. der Seiten  $a$  und  $c$ ) gesucht wird. Eine Seite des roten Dreiecks hat jeweils die Länge  $2 \cdot r$ .

Alle Winkel des roten Dreiecks betragen  $60^\circ \Rightarrow \alpha = \frac{60^\circ}{2} = \frac{\pi}{6} = 30^\circ$

Die Winkel des schwarzen Dreiecks sind im Kasten rechts oben in der Abb. 2 dieser Anlage dargestellt.

$$r = R \cdot \cos \frac{\pi}{6} = R \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\Rightarrow R = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot r \approx 1,155r \approx 11,547$$

$$R_{\text{neu}} = 10$$

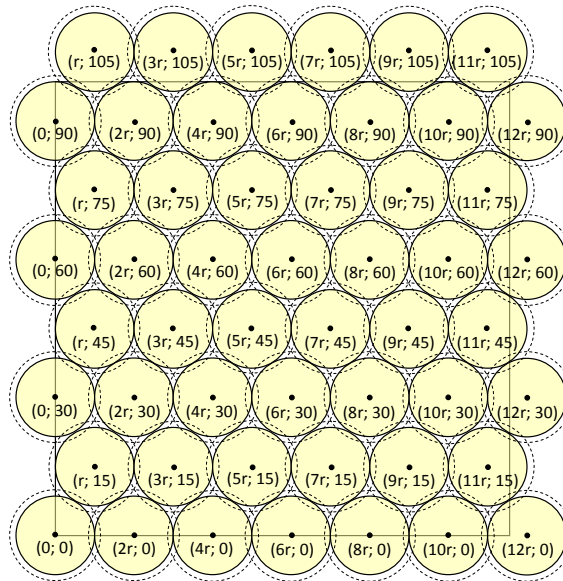
$$\Rightarrow r_{\text{neu}} = \frac{\sqrt{3}}{2} 10 = 5\sqrt{3} \approx 8,66$$

Die Ermittlung der Baumanzahl pro Hektar erfolgt grafisch (siehe Abb. 3 dieser Anlage). Dazu wird neben dem Radius  $r_{\text{neu}}$  der neuen Kreise auch  $h_{2\text{neu}}$  (siehe Abb. 2 dieser Anlage) benötigt.

$$h_{1\text{neu}} = \sqrt{\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 5\sqrt{3}\right)^2 - (5\sqrt{3})^2} = 5$$

$$h_{2\text{neu}} = 5 + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 5\sqrt{3} \approx 15$$





Anlage 16\_Abb. 3: Grafische Lösung zur Ermittlung der Baumanzahl pro Hektar

Die grafische Ermittlung der Baumanzahl ergibt 52 Birken auf einem Hektar. Es ist davon auszugehen, dass an diesen Hektar die nächsten Hektare angrenzen, weshalb die Randbäume von zwei Seiten (z. B. oberste und rechte Baumreihe in Abb. 3 dieser Anlage) beim Zählen weglassen werden. So ergeben sich **42 Bäume/ha**.

**Erklärung:**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als diese kenntlich gemacht worden. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten: Herrn Prof. Dr. habil. Karl-Heinz Feger sowie Herrn Prof. Dr. habil. Sven Wagner

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zwecke der Promotion vorgelegt und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Ich bestätige, dass ich die Promotionsordnung der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU-Dresden anerkenne.

.....  
Ort, Datum

.....  
Unterschrift